**引用格式:**黄丰,郭淳,邱冰兵,等.基于电磁-结构场的油浸式变压器振动特性及信号反演研究[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):276-286. **Citation:** HUANG Feng, GUO Chun, QIU Bingbing, et al. Vibration characteristics and signal inversion of oil-immersed transformer based on electromagnetic-structural field[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(2):0-00.

# 基于电磁-结构场的油浸式变压器振动特性及 信号反演研究

黄 丰<sup>1</sup>,郭 淳<sup>1</sup>,邱冰兵<sup>1</sup>,邱晓丹<sup>1</sup>,杨 毅<sup>2</sup>,袁发庭<sup>2</sup>,姬睿氢<sup>2</sup> (1,广东省电网有限责任公司潮州供电局,广东潮州 521000:2,三峡大学电气与新能源学院,湖北 宜昌 443000)

**摘 要:**油浸式变压器作为电力系统中变电部分的关键设备,其运行状态直接影响电网的安全与稳定。先基于有限元仿真软件COMSOL,建立10kV/400V的油浸式变压器电磁一结构多物理场耦合计算模型,分析加与未加夹件对铁芯振动位移影响,并在此基础上,分析铁芯、绕组和油箱壁上振动特性,提取铁芯、绕组和油箱壁面振动加速度信号;再利用Kendall与Spearman相关系数,对铁芯、绕组与油箱壁振动信号进行相关性计算,得到了最佳振动测量位置;然后,基于Copula函数,建立利用油箱外壁信号反映内部铁芯和绕组运行状态的油浸式变压器振动反演模型,获得在不同负载条件下铁芯和绕组振动加速度反演结果;最后,利用绝对系数 R<sup>2</sup>和平均绝对误差对模型准确性进行判别。研究结果表明,该反演模型准确度在94%以上。该研究可为变压器振动故障检测提供借鉴。 **关 键 词:**油浸式变压器;多物理场;振动特性;反演模型

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.029 中图分类号:TM411 文章编号:1673-9140(2025)02-0276-11

# Vibration characteristics and signal inversion of oil-immersed transformer based on electromagnetic-structural field

HUANG Feng<sup>1</sup>, GUO Chun<sup>1</sup>, QIU Bingbing<sup>1</sup>, QIU Xiaodan<sup>1</sup>,

YANG Yi<sup>2</sup>, YUAN Fating<sup>2</sup>, JI Ruiqing<sup>2</sup>,

(1. Chaozhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Chaozhou 521000, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

**Abstract:** As critical equipment in the power system, the operation status of oil-immersed transformers directly affects the safety and stability of the power grid. Based on COMSOL, a finite element simulation software, a 10kV/400V oil-immersed transformer electromagnetic – structural multiphysics coupling calculation model is established to analyze the effect of added/unadded clamping devices on the core vibration displacement. On this basis, the vibration characteristics of the core, windings, and tank wall are analyzed, and their corresponding vibration acceleration signals are extracted. Subsequently, the Kendall and Spearman correlation coefficients are employed to calculate the correlation among the vibration signals of the core, windings, and tank wall, obtaining the optimal position for measuring vibration. Based on the Copula function, a vibration inversion model for the oil-immersed transformer is developed, which utilizes the external tank wall signals to reflect the operation status of the internal core and windings. The inversion results for the core and winding vibration acceleration are obtained under different load conditions. Finally, the model's accuracy is evaluated using the coefficient of determination ( $R^2$ ) and mean absolute error. The results show that the inverse model achieves an accuracy rate of above 94%. The findings provide a reference for transformer vibration fault detection. **Key words**; oil-immersed transformer; multiphysics; vibration characteristic; inversion model

基金项目:南方电网公司科技项目(035100KC23070004(GDKJXM20230768))

通信作者:袁发庭(1988—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事高压电抗器设计与电工装备多物理场分析等方面的研究;E-mail: yuanfatinghss@163.com

收稿日期:2024-05-20;修回日期:2024-10-22

随着中国经济建设的不断发展,工业生产与国 民生活的电力需求逐年增加。油浸式变压器作为 电力系统中的重要设备,其稳定是维持电网安全与 可靠运行的保证。然而,油浸式变压器在长期运行 过程中,必然会受到各种过电压、大电流的冲击。 其内部铁芯产生的剧烈振动会导致变压器结构损 毁,绝缘破坏,甚至威胁电网的安全,造成严重经济 损失<sup>[13]</sup>。因此,探究油浸式变压器振动特性,提出 基于油箱壁振动信号反映变压器内部振动特性的 油浸式变压器振动反演模型至关重要<sup>[45]</sup>。近年来, 国内外相关学者针对油浸式变压器的振动特性与 反演模型两方面开展了大量研究。

在振动特性方面,文献[6]指出变压器振动的 主要来源为铁芯硅钢片磁致伸缩;文献[7-10]研 究了铁芯磁致伸缩特性、电磁场分布等问题;文 献[11-13]分析得到了准确的硅钢片磁致伸缩模 型,建立了电磁-结构-声多物理场耦合仿真计算 模型;文献[14]建立了与试验变压器参数一致的 三维仿真计算模型;文献[15-16]分析了在不同负 载下小容量变压器电磁振动特性的影响因素,得 出了铁芯振动是变压器内部振动的主要部分,绕 组振动是次要部分的结论。这些研究主要聚焦于 变压器铁芯或绕组部分,忽视了夹件因素对变压 器振动特性的影响。

在反演模型建立方面,文献[17-20]通过试验 测量,分析了不同工况下的变压器箱体振动信号 分布特征,建立了箱体振动信号与变压器内部运 行状态模型;文献[21]建立了变压器仿真计算模 型,并基于振动信号对内部绕组故障进行反演;文 献[22]将试验测量与多物理场仿真相结合,分析 了不同运行状态下绕组振动改变导致的油箱振动 差异。这些研究主要聚焦利用油箱表面振动信号 来评估内部运行状态,忽视了对内部振动信号的 反演。

本文先对硅钢片的磁滞特性与磁致伸缩特性 进行测量,得到材料磁特性参数;再基于有限元仿 真软件COMSOL,建立考虑材料磁致伸缩效应的 电磁一结构多物理场耦合仿真模型,分析得到变压 器铁芯振动与油箱壁面的振动特性;然后,基于 Copula函数,建立油箱壁面与变压器内部铁芯和绕 组之间的振动信号反演模型,并根据所建立的反演 模型,得到变压器内部铁芯振动信号反演结果;最 后,利用决定系数*R*<sup>2</sup>和平均相对误差对模型的准确 性进行判别,验证该模型的准确性。

# 1 油浸式变压器结构参数及模型建立

### 1.1 油浸式变压器基本结构及参数

本文研究对象为某型号 10 kV/400 V 油浸式变 压器,其额定容量为 400 kVA。该油浸式变压器主 要由铁芯、高低压绕组、铁芯夹件、连接件和变压器 油箱等5个部分组成,其结构如图1所示,各结构参 数见表1。



■夹件 🖾低压绕组 🗖高压绕组 🔲铁芯

图1 油浸式变压器基本结构

Figure 1 Basic structure of oil-immersed transformer

表1 油浸式变压器结构参数

Table 1	Structural	parameters o	f oil-immersed	transformer
---------	------------	--------------	----------------	-------------

	铁芯长/	铁芯高/	窗宽/	窗高/	低压绕组
	mm	mm	mm	mm	半径/mm
	1 284.8	1 024.0	327.4	604.0	173.0
	高压绕组	线圈宽度/	高压绕组	低压绕	油箱/
	半径/mm	mm	匝数	组匝数	mm
220.2	10.0	1.000	4.4	$2~000 \times$	
	220.Z	40.0	1 000	44	$1200\! imes\!1800$

### 1.2 仿真模型建立

根据表1的结构参数,利用有限元仿真软件 COMSOL,建立油浸式变压器三维仿真模型。在实 际中,油浸式变压器内部结构复杂,为兼顾仿真计算 精度和计算时长,对绕组和接线部分进行简化,忽略 绕组撑条和垫块。该仿真模型结构如图2所示。



Figure 2 3D model of oil-immersed transformer and measurement point selection

## 2 油浸式变压器振动特性分析基础

### 2.1 变压器内部振动传播机理

油浸式变压器振动主要由铁芯的磁致伸缩力 与高、低压绕组的麦克斯韦电磁力两者共同引起。 振动信号在油浸式变压器主要通过铁芯和绕组与 油箱的连接件与变压器油传播,其振动信号传播途 径如图3所示。



图3 振动信号传播途径



### 2.2 磁场基本理论

在实际中,油浸式变压器的电流为三相正弦交 流电,该交流电其幅值随时间变化的特性,使变压 器铁芯内部产生与其变化频率一致的交变磁场。 该内部磁场的方程可简化为<sup>[23-25]</sup>

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

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

式(1)、(2)中,H为磁场强度向量;J为电流向量;B 为磁通密度向量;A为磁矢势向量;▽为拉普拉斯 算子。

由式(1),可得磁矢势与电流的关系,即

$$\nabla \times \left(\mu^{-1} \nabla \times A\right) = J - \eta \frac{\partial A}{\partial t} \tag{3}$$

式中,μ为磁导率;η为电导率;t为时间。

### 2.3 振动特性原理

变压器振动主要源于麦克斯韦电磁力和磁致 伸缩力。这两个力的求解方程分别为

$$F_{\text{max}} = \int_{S} T dS = \int_{S} (BH - \frac{1}{2}BHI) dS \qquad (4)$$

$$F_{\rm mag} = -\nabla \cdot \sigma = -\nabla \cdot (D\varepsilon) = -\nabla \cdot (Df(B)) (5)$$

式(4)、(5)中, $F_{max}$ 为麦克斯韦电磁力; $F_{mag}$ 为磁致伸 缩力,T为麦克斯韦应力张量;I为单位矩阵; $\sigma$ 为磁 致伸缩应力;D为材料弹性模量矩阵; $\varepsilon$ 为磁致伸缩 应变;S为面积;f(B)为基于磁通密度的函数。

铁芯各组件均可视为线性弹性材料,其振动过 程可用弹性力学方程来描述<sup>[26-27]</sup>,即

$$M_{\rm c} \frac{\partial^2 u_{\rm c}}{\partial t^2} + C \frac{\partial u_{\rm c}}{\partial t^2} + K_{\rm c} u_{\rm c} = F_{\rm max} + F_{\rm mag} \qquad (6)$$

式中,*M*。为铁芯的质量矩阵;*u*。为铁芯的振动位移 量;*C*为铁芯的阻尼矩阵;*K*。为铁芯的刚度矩阵。这 些矩阵均可由铁芯的材料参数和结构尺寸等计算 得到。

### 2.4 材料参数设置

为准确计算变压器整体振动特性,对变压器铁芯主要组成材料硅钢片的磁化特性与磁致伸缩特性的测量就显得尤其重要<sup>[28-29]</sup>。先利用电工钢片测量系统,测量型号为27Q120硅钢片样片的饱和磁滞回线和磁致伸缩曲线,测量频率为50Hz;再基于J-A磁滞模型,利用粒子群参数辨识,其辨识结果如图4所示。算法得到的硅钢片磁致伸缩参数见表2。



图4 27Q120型号硅钢片拟合结果比对

Figure 4 Comparison of fitting results of 27Q120 silicon steel sheet

表2 硅钢片结构参数

**Table 2** Structural parameters of silicon steel sheet

曲线	饱和磁化强 度/(A・m <sup>-1</sup> )	形状 系数	可逆 系数	磁畴耦 合系数	不可逆 损耗 系数	饱和磁致 伸缩系数/ (μm・m)
磁滞回线	1 933 365.79	24.25	0.19	$5.11 \times 10^{-5}$	31.93	_
磁致伸缩	1 933 365.79	24.25	0.19	$5.11 \times 10^{-5}$	31.93	$1.19 \times 10^{-6}$

### 2.5 边界条件设置

将电磁场计算得到的电磁力和磁致伸缩力通 过多物理场耦合后,施加在结构力学物理场中;并 将变压器油等效为良性固体传播媒介。考虑变压 器实际安装情况,将变压器油箱底部表面设定为固 定约束,其他表面设定自由变形,变压器本体与油 箱相互连接,边界条件设置如图5所示。







### 2.6 仿真结果

基于电路一磁场耦合方法<sup>[20]</sup>,将三相电压频率 设为50 Hz,计算求解步长设为0.001 s,求解时长设 为0.04 s。采集0.01 s时刻的铁芯、绕组和油箱的磁 场磁通密度与结构力场振动位移分布,结果分别如 图 6~8 所示。



results of core

从图 6、7 中可以看出,铁芯的磁通密度主要分 布于铁芯窗口内侧,其最大值点位于铁芯柱与铁轭 夹角处,该数值为 1.62 T。铁芯的振动位移主要分 布于铁芯柱的中部位置,最大振动位移为 1.32 μm。 绕组振动位移为 0.09 μm。



从图 8 中可以看出,油箱振动最大值点主要分 布于油箱顶层,该最大值为 0.47 μm。油箱侧壁的 振动位移比油箱前壁的小<sup>[31]</sup>,故在分析油箱振动特 性时,主要分析油箱前壁与顶层的振动特性。

# 3 油浸式变压器振动特性分析及信号提取

#### 3.1 铁芯振动特性

在实际工程安装中,油浸式变压器铁芯的振动在 结构上受到了夹件的抑制作用。在进行变压器磁场 和结构场仿真计算时,不能简单地将夹件等结构件等 效为固定约束。本文分析了加与未加夹件两种情况 下的铁芯振动位移分布,其仿真结果如图9所示。



从图 9 中可以看出,不考虑夹件因素的振动 位移峰值为1.77 μm,而考虑夹件因素的铁芯振 动位移峰值为1.32 μm,其比不考虑夹件因素的 降低了25.42%。考虑夹件的仿真计算模型约束 更贴近实际变压器固定约束条件,其仿真结果更 精确。

基于改进后油浸式变压器仿真计算模型,可以

发现铁芯的振动主要集中在铁芯柱上,提取图2上 铁芯测量点的磁场和振动位移随时间变化曲线,结 果如图10所示。

从图 10 中可以看出,最大振动位移位于铁芯测 量点1处,其值为0.44 μm;相较于铁轭部分,其铁芯 振动主要出现在铁芯柱处,其整体振动位移分布与 该点磁场变化趋势基本一致。





Figure 10 Magnetic flux density and vibration displacement of core column sampling point

### 3.2 绕组振动特性

绕组振动主要由导线上电磁力所引起。对于 装机容量较大的油浸式变压器,其流经导线的电流 较大,导致绕组线圈受到电磁力增强,进而增大了 绕组振动,本文分析了高压绕组与低压绕组的振动 位移分布情况,其仿真计算结果如图11所示。







从图 11 中可以看出,绕组振动主要分布在绕组 上、下两端,且其振动位移最大值均出现在绕组与 紧固件连接点处。其中,高压绕组振动位移最大值 为0.091 μm,低压绕组振动位移最大值为0.095 μm。 提取图 5 中各相高压绕组振动位移随时间变化曲 线,结果如图12 所示。



从图 12 中可以看出,A 相绕组振动大于其他相的,其振动位移最大值为 0.09 μm。低压与高压绕 组振动的整体分布均呈现出了周期性,低压绕组振 动位移总体大于高压绕组振动位移。

### 3.3 油箱振动特性

分析图 8 中变压器油箱的整体振动位移分布可 知,振动主要出现在油箱前壁与油箱顶层。提取 0.01 s时刻的油箱振动位移数据,结果如图 13 所示。

从图 13中可以看出,油箱顶层应力主要分布于 左侧,最大应力为 1.31×10<sup>4</sup> N/m<sup>2</sup>;油箱前壁应力分 布于左上角处,最大应力为 1.94×10<sup>4</sup> N/m<sup>2</sup>。顶层 和前壁振动主要分布于其中心左侧,其振动位移最 大值分别为 0.35、0.28 μm。提取前壁油箱测点的应 力与振动加速度,结果如图 14 所示。

从图 14 中可以看出,油箱测量点1处的应力 最大,其值为2973 N/m<sup>2</sup>,其最大振动加速度为 0.017 m/s<sup>2</sup>。位于中部的油箱测量点4处的应力最大 值为2232 N/m<sup>2</sup>,其振动加速度最大为0.009 m/s<sup>2</sup>。 据此可以得到结论:油箱前壁最大振动主要分布于 油箱中、上部,其应力大小与振动加速度变化的趋 势基本一致。

### 3.4 振动信号提取

考虑到油箱顶层存在的复杂线路结构,并结合 油箱壁面振动分布特点,油箱前壁相较于油箱顶层 更易采集振动分布信号。变压器各相绕组部分振 动信号提取点如图5所示,变压器铁芯和油箱前壁 信号提取位置如图15所示。





transformer tank





Figure 14 Stress and vibration displacement of sampling points on tank wall



(a)变压器铁芯提取点 (b)油箱前壁提取点

Figure 15 Extraction point of vibration signal

# 4 基于 Copula 函数的变压器振动反 演模型建立

### 4.1 Copula函数

变压器铁芯和油箱的振动信号复杂,利用常规 相关性分析方法难以找寻到这二者之间的关联性, 难以建立反演模型。Copula函数能将变量的随机性 与耦合性分开,可表征复杂变量之间相关性。因此, 本文基于Copula函数,建立铁芯振动信号与油箱壁 振动信号之间的联合分布函数和概率密度函数,即

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) = C(u_1, \dots, u_n)$$
(7)  
$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial^n C(u_1, \dots, u_n)}{\partial u_1 \dots \partial u_n} \prod_{i=1}^n \frac{\partial F_i(x_i)}{\partial x_i}$$
(8)

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = D(u_1, u_2, \dots, u_n) \prod_{i=1}^n f_i(x_i)$$
(9)

式(7)~(9)中, $F_1(x_1)$ , $F_2(x_2)$ ,…, $F_n(x_n)$ 均为变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 的边缘分布函数; $F(x_1, x_2, \dots, x_1)$ 为联合 分布函数; $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为边缘概率密度函数;  $C(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 为 Copula 函数; $D(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 为 Copula密度分布函数;x, u均为变量。

基于 K-S 检验原理,结合 AIC 信息准则,确定 各组测量点最优边缘分布函数和最优概率模型:

$$I_{\rm AIC} = -2\ln(L) + 2k \tag{10}$$

式中,L为似然函数;k为参数数量。

为选取最优 Copula 函数,采用 Kendall 秩相关 系数和 Spearman 秩相关性系数来表征非线性变量 之间的一致性和单调性,即

Ν

$$\tau = \frac{2\sum_{i < j} \operatorname{sign}\left[(x_{1i} - x_{1j})(x_{2i} - x_{2j})\right]}{N(N-1)} \quad (11)$$

$$\rho_{s} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^{N} (P_{i} - Q_{i})^{2}}{N(N^{2} - 1)}$$
(12)

式(11)、(12)中, $\tau$ 为Kendall秩相关系数; $\rho_s$ 为Spearman 秩相关性系数; $x_{1i}$ 和 $x_{2i}$ 为变量观测数据;N为样本数,sign[·]为符号函数; $P_i$ 和 $Q_i$ 分别为变量的秩次。

采用 Frank-Copula 函数  $C_{\text{Frank}}(u_1, u_2; \theta)$ 、t-Copula 函数  $C_t(u_1, u_2; \theta)$ 、Clayton-Copula 函数  $C_{\text{Clayton}}(u_1, u_2; \theta)$ 、Gaussian-Copula 函数  $C_{\text{Gaussian}}(u_1, u_2; \theta)$ 和 Gumbel-Copula 函数  $C_{\text{Gumbel}}(u_1, u_2; \theta)$ 作为备选函数,这些函数的秩相关系数即为<sup>[32]</sup>

$$C_{\text{Frank}}(u_{1}, u_{2}; \theta) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[ 1 + \frac{(e^{-\theta u_{1}} - 1)(e^{-\theta u_{2}} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$$
(13)

$$C_{t}(u_{1}, u_{2}; \theta) = \int_{-\infty}^{1} \int_{-\infty}^{(u_{1}/1)} \frac{1}{2\pi \sqrt{1 - \theta^{2}}} \cdot \left[1 + \frac{x_{1}^{2} - 2\theta x_{1} x_{2} + x_{2}^{2}}{v(1 - \theta^{2})}\right]^{-(v + 2)/2} dx_{1} dx_{2} \quad (14)$$

$$C_{\text{Clayton}}(u_1, u_2; \theta) = (u_1^{-\theta} + u_2^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$$
 (15)

$$\int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_1)\Phi^{-1}(u_2)} \int_{-\infty}^{\frac{1}{2\pi\sqrt{1-\theta^2}}} e^{\left[-\frac{x_1^2 - 2\theta x_1 x_2 + x_2^2}{2(1-\theta^2)}\right]} dx_1 dx_2$$
(16)

 $C_{\text{Gaussian}}(u_1, u_2; \theta) =$ 

$$C_{\text{Gumbel}}(u_1, u_2; \theta) = e^{\left\{-\left[(-\ln u_1)^{\theta} + (-\ln u_2)^{\theta}\right]^{\theta}\right\}} \quad (17)$$

$$= 1 + \frac{4}{\theta} \left[ \frac{1}{\theta} \int_{0}^{\theta} \frac{t}{\mathbf{e}^{t} - 1} \,\mathrm{d}t - 1 \right]$$
(18)

式(13)~(18)中, $\tau$ 为Kendall秩相关系数; $\theta$ 为Copula 函数参数; $T_v$ 为自由度为v的一维t分布函数; $\Phi^{-1}$ 为一 维正态分布逆函数; $u_1, u_2$ 均为Copula函数中的参数。

### 4.2 基于Copula函数的反演模型建立

τ

基于不同信号振动参数之间的 Copula 联合分 布函数模型,建立油浸式变压器振动反演模型,其 反演步骤共有6步。

 根据计算得出的油箱和铁芯特征参数的样本值{m<sub>i</sub>,n<sub>i</sub>},其中 i=1,2,3…。计算得出最优边缘 分布函数,即F(m)=U,F(n)=V。

2) 基于  $M \in M_{t+1}$  概率分布函数  $U_i = F(M_{t+1})$ , 求的  $M_{t+1}$  对应最优 Copula 联合分布函数, 式中 $\theta_1$ 为 Copula 函数参数, 则仅有一个未知量 V, 即

$$C_R = C_1(U_1, V; \theta_1) \tag{19}$$

3)使用步骤1)、2)计算得出的联合分布函数, 对数据进行多项式拟合,即

$$C_{R} = a_{1}V^{R+1} + a_{2}V^{R} + a_{3}V^{R-1} + \dots + a_{R+1}$$
(20)

式中, a1、a2、a3、…、aR+1为多项式系数; R为拟合

图15 振动信号提取点

系数。

4) 将步骤 2)、3)进行联立求解,可以得到步骤 2)中未知量 n的边缘函数 V<sub>i</sub>。

5) 对边缘分布函数 *V<sub>i</sub>*=*F*(*y*)进行逆变换,得 到对应 *V*值的 *Y<sub>i</sub>*=10

6)利用决定系数 R<sup>2</sup>值和平均绝对误差值对反 演模型进行评价。

其中,*R*<sup>2</sup>取值范围为[0,1],其数值越接近于1, 模型的反演效果越好。平均绝对误差取值范围为 [0,+∞],其值越大,模型误差越大<sup>[33]</sup>。

4.3 相关性分析及最优 Copula 函数选取

根据变压器油箱、铁芯和绕组振动测量点的数据,采用其中24组特征信号作为变量,选取广义极值分布(generalized extreme value,Gev)、广义Pareto分布(generalized pareto distribution,GPD)和对数正态分布函数(logarithmic normal distribution)这3种概率分布函数作为数据拟合函数。基于K-S检验方法与AIC信息准则,判别得出24个特征参数所对应的最优边缘分布函数。若判别结果为0,则通过检验;反之,若判别结果为1,则未通过检验。判断结果见表3。

由表3可知,24个特征信号均含有一种或一种 以上的边缘函数通过K-S检验。其中,对数正态分 布函数和广义极值分布的边缘函数通过率最高。 由表3还可知,若单考虑K-S检验,则仅有11组特征 点通过检验。故仍需引入AIC信息准则对K-S检 验结果进行二次检验。从最终判别结果上看,最优 边缘函数广义极值分布的有12组,广义Pareto分布 与正态分布函数的各有6组。

以Kendall 秩相关系数和 Spearman 秩相关性系 数来表征变压器铁芯和绕组各点振动特征信号和 油箱前壁各点特征信号之间的相关性,这两种相关 性系数的越接近1,则信号之间的相关性越强。该 计算结果如图16所示。

从图 16 中可以看出, Spearman 相关性系数和 Kendall 相关性系数表明变压器内部振动信号与油 箱前壁振动信号具有较强的相关性,铁芯 A 点与油 箱壁 A1 点的 Spearman 和 Kendall 相关性系数分别 为0.876 和0.803,绕组L 点与油箱 F1 点的相关性最 高,其相关性系数分为别0.872 和0.774。这验证了利 用油箱前壁振动信号去反演变压器内部铁芯振动 情况方案的可行性。同时,铁芯上部振动信号与油 箱上部振动信号相关性较大。结合铁芯和绕组振 动与油箱前壁振动特性分布,可将振动加速度测点

	表 3	最优边缘分布函数	
Table 3	Optima	al marginal distribution	function

亡口	\$ ¥4	]	K-S检验	最优边缘	
伃兮	参奴	Gev	GP	Logn	分布
1	铁芯A点	1	1	1	Logn
2	铁芯 B 点	0	1	1	Gev
3	铁芯 C 点	0	0	1	Gev
4	铁芯D点	0	1	1	Gev
5	铁芯 E 点	0	0	1	Gev
6	铁芯 F 点	0	1	1	Gev
7	铁芯G点	1	1	1	Logn
8	铁芯日点	0	1	1	Gev
9	铁芯 I 点	1	0	1	GP
10	绕组1点	0	0	1	Gev
11	绕组K点	1	1	1	Logn
12	绕组L点	0	1	1	Gev
13	绕组M点	1	0	1	GP
14	绕组N点	0	1	1	Gev
15	绕组0点	1	0	1	GP
16	油箱 $A_1$ 点	0	1	1	Gev
17	油箱 B1点	1	1	1	GP
18	油箱 C1点	1	1	1	Gev
19	油箱 D <sub>1</sub> 点	0	1	1	Gev
20	油箱 $E_1$ 点	1	1	1	GP
21	油箱 $F_1$ 点	1	1	1	GP
22	油箱 $G_1$ 点	1	1	1	Logn
23	油箱 H1点	1	1	1	Logn
24	油箱 I1点	1	1	1	Logn





设置于油箱前壁来检测变压器内部振动情况。

根据变压器铁芯、绕组和油箱前壁振动信号分 布特点,选取5种备选Copula函数,通过各参数之间 Kendall 秩相关性系数,来计算Copula函数的参数 θ,并基于 AIC 准则确定各振动参数点的最佳 Copula函数,相关计算结果见表4。由表4可知,5 种Copula函数中t-Copula和Frank-Copula函数为最

2025 年 3 月

优 Copula 函数的情况较多。其中, Copula-Frank 函数通过检验数量为16个,最优 Copula 函数为t-Copula 函数的数量为8个。

表4 各振动测点最优 Copula 函数

**Table 4** Optimal Copula functions for each vibration

measurement point						
序号	参数	最优 Copula 函数	参数θ			
1	铁芯A点	t-Copula	0.52			
2	铁芯 B 点	Frank-Copula	14.61			
3	铁芯 <i>C</i> 点	Frank-Copula	22.10			
4	铁芯D点	Frank-Copula	17.72			
5	铁芯E点	t-Copula	0.59			
6	铁芯F点	Frank-Copula	22.17			
7	铁芯G点	t-Copula	0.51			
8	铁芯日点	Frank-Copula	13.29			
9	铁芯 I 点	Frank-Copula	20.55			
10	绕组1点	t-Copula	0.67			
11	绕组K点	Frank-Copula	14.49			
12	绕组L点	Frank-Copula	15.28			
13	绕组 M 点	Frank-Copula	12.59			
14	绕组 N 点	Frank-Copula	9.29			
15	绕组 <i>0</i> 点	t-Copula	0.48			
16	油箱 $A_1$ 点	Frank-Copula	17.28			
17	油箱 $B_1$ 点	Frank-Copula	18.95			
18	油箱 $C_1$ 点	Frank-Copula	14.59			
19	油箱 D <sub>1</sub> 点	Frank-Copula	17.23			
20	油箱 $E_1$ 点	Frank-Copula	17.40			
21	油箱 $F_1$ 点	Frank-Copula	19.10			
22	油箱 $G_1$ 点	t-Copula	0.48			
23	油箱 H1点	t-Copula	0.46			
24	油箱五点	t-Copula	0.48			

### 4.4 反演模型验证

根据基于 Copula 函数的铁芯和绕组振动与油 箱前壁振动参数联合分布数学模型,建立基于油箱 前壁振动信号的油浸式变压器内部反演模型。本 文仿真计算 60%~120% 的额定负载下的油浸式变 压器铁芯、绕组和油箱前壁振动信号的最优 Copula 函数。利用所建立反演模型对不同负载情况进行 反演,结果如图 17 所示。

从图 17 中可以看出,铁芯和绕组振动反演结果 与实际值相差不大。本文利用决定系数 R<sup>2</sup>值和平 均绝对误差值对实际结果和反演结果进行评价,结 果见表 5。在额定负载、过负载和欠负载情况下的 铁芯和绕组振动加速度反演结果 R<sup>2</sup>值均大于 94%。 这验证了该反演模型的有效性和准确性。



负载情况/	铁芯反演	平均绝对误	绕组反演	平均绝对误
%	$R^2$ 值	$差/(m \cdot s^{-2})$	$R^2$ 值	$差/(m \cdot s^{-2})$
60	0.968 54	0.127 49	0.945 84	0.514 85
70	0.963 87	0.521 83	0.953 14	0.325 62
80	0.965 98	0.325 74	0.951 47	0.145 58
90	0.964 55	0.311 68	0.956 84	0.314 52
100	0.963 53	0.458 07	0.949 84	0.548 31
110	0.963 51	0.287 97	0.961 57	0.625 14
120	0.974 86	0.253 67	0.945 18	0.214 58

### 4 结语

本文建立了基于电磁一结构力多物理场油浸 式变压器仿真计算模型,分析夹件对铁芯振动特性 影响,得到变压器振动特性。在此基础上,建立基 于 Copula 函数的铁芯与油箱壁面振动加速度信号 间的反演模型,得到以下结论:

1) 基于 J-A 磁滞模型和粒子群辨识算法,得到了 材料磁滞和磁致伸缩模型参数,并建立考虑材料磁致 伸缩特性的油浸式变压器电磁-结构多物理场仿真计 算模型,对比分析了加与未加夹件对铁芯振动分布的 影响,得到夹件对铁芯的振动分布影响不可忽略。

2) 基于 Spearman 和 Kendall 相关性分析方法 得到了铁芯上铁轭和绕组与油箱壁中上部振动信 号联系紧密,相关性系数分别为87.6%和87.2%, 其与油箱下部振动信号相关性较差。

3) 基于Copula函数原理,建立了油浸式变压器 铁芯运行状态反演模型,利用油箱前壁信号,对不 同负载情况下的铁芯和绕组振动加速度信号进行 了反演,反演结果准确度均大于94%,验证了反演 模型的准确性与可行性。

### 参考文献:

- [1] 郑玉平,郝治国,薛众鑫,等.大型电力变压器安全运行与主动保护技术探索[J].电力系统自动化,2023,47(20):1-12.
   ZHENG Yuping, HAO Zhiguo, XUE Zhongxin, et al.
   Exploration of safe operation and active protection technology for large-capacity power transformers[J].
   Automation of Electric Power Systems,2023,47(20):1-12.
- [2] 杨金鑫,廖才波,胡雄,等.基于DGA与TPE-LightGBM的变 压器故障诊断[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):70-77.
   YANG Jinxin,LIAO Caibo,HU Xiong,et al. Transformer fault diagnosis based on DGA and TPE-LightGBM[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(4):70-77.
- [3] 田旭,张逸伦,张桂红,等.器件混合型直流变压器控制 建模及扰动[J].电网与清洁能源,2024,40(10):13-23.
   TIAN Xu,ZHANG Yilun,ZHANG Guihong,et al.The control modeling and disturbance of the hybrid DC transformer[J].
   Power System and Clean Energy,2024,40(10):13-23.
- [4] 李继攀,刘宏领,郭奇军,等.基于功率因数角的接地变 压器匝间短路故障辨识[J].供用电,2023,40(9):50-57.
   LI Jipan,LIU Hongling,GUO Qijun, et al. Identification of inter turn short circuit fault of grounding transformer based on power factor angle[J]. Distribution & Utilization,2023,40(9):50-57.
- [5] 包玉树,胡永建,吕佳,等.变压器铁芯接地电流在线监测系统设计及其带电检测不确定度评定[J].电测与仪表,2023,60(4):150-154.
  BAO Yushu, HU Yongjian, Lyu Jia, et al. Design of on-line monitoring system for grounding current of transformer core and evaluation of uncertainty in live detection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(4):150-154.
- [6] SOMKUN S, MOSES A J, ANDERSON P I. Effect of magnetostriction anisotropy in nonoriented electrical steels on deformation of induction motor stator cores[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2009,45(10):4744-4747.
- [7] AZUMA D, ITO N, OHTA M. Recent progress in Febased amorphous and nanocrystalline soft magnetic

materials[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2020,501:166373.

- [8] PLOTKOWSKI A, CARVER K, LIST F, et al. Design and performance of an additively manufactured high-Si transformer core[J].Materials & Design,2020,194:108894.
- [9] MARKS J, VITOLINA S, DIRBA J. Magnetostrictive vibration model for evaluation of mechanical integrity of power transformer magnetic core[J]. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences,2019,56(3):13-25.
- [10] PETRESCU L G, PETRESCU M C, IONIȚĂ V, et al. Magnetic properties of manganese-zinc soft ferrite ceramic for high frequency applications[J]. Materials, 2019, 12(19):3173.
- [11] 陈 昊,李琳,王亚琦.基于 Energetic 和改进 Jiles-Atherton-Sablik模型的电工钢片动态磁致伸缩特性模 拟[J].中国电机工程学报,2024,44(2):848-858. CHEN Hao,LI Lin, WANG Yaqi. Simulation of dynamic magnetostriction characteristics of electrical steel sheet based on energetic and the improved jiles-Atherton-sablik models[J].Proceedings of the CSEE,2024,44(2):848-858.
- [12] 钟思翀,祝丽花,王前超,等.电力变压器振动噪声分析及 其有源降噪[J].电工技术学报,2022,37(增刊1):11-21.
  ZHONG Sichong, ZHU Lihua, WANG Qianchao, et al. Electromagnetic vibration of power transformer and active noise reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(sup 1):11-21.
- [13] 张文杰,吕世轩,高启瑄,等.基于固态变压器的交直流 混合配电系统协调运行控制策略[J].电力建设,2023,44
   (4):103-112.

ZHANG Wenjie, Lyu Shixuan, GAO Qixuan, et al. Coordinated operation control strategy of AC/DC hybrid distribution system based on solid-state transformer[J]. Electric Power Construction,2023,44(4):103-112.

[14] 刘建锋,李志远,周亚茹.基于漏磁场和ICOA-ResNet的变压器绕组早期故障诊断[J].电力系统保护与控制,2024,52(9):99-110.
LIU Jianfeng, LI Zhiyuan, ZHOU Yaru. Transformer windings based on leakage field and ICOA-ResNet early

windings based on leakage field and ICOA-ResNet early fault diagnosis[J].Power System Protection and Control, 2024,52(9):99-110.

- [15] 祝丽花,王斌,刘松,等.不同负载对干式变压器电磁振动的影响分析[J].电工技术学报,2018,33(7):1599-1606. ZHU Lihua, WANG Bin, LIU Song, et al. Research on electromagnetic vibration of dry type transformer under different types of load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(7):1599-1606.
- [16] 贾俊,范炜豪,吕志鹏,等.用于电动汽车集群并网的直流变压器启动研究[J].发电技术,2023,44(6):875-882.
  JIA Jun,FAN Weihao,Lyu Zhipeng, et al.Research on startup of DC transformer for electric vehicle cluster grid-connection
  [J].Power Generation Technology,2023,44(6):875-882.
- [17] 汲胜昌,李彦明,傅晨钊.负载电流法在基于振动信号分 析法监测变压器铁心状况中的应用[J].中国电机工程

学报,2003,23(6):154-158.

JI Shengchang,LI Yanming,FU Chenzhao. Application of on-load current method in monitoring the condition of transformers core based on the vibration analysis method [J].Proceedings of the CSEE,2003,23(6):154-158.

- [18] 程锦,汲胜昌,刘家齐,等.绕组振动信号监测法中测试 位置的影响与分析[J].高电压技术,2004,30(10):46-48. CHENG Jin, JI Shengchang, LIU Jiaqi, et al. Analysis of the measuring position for on-line monitoring on vibration signal of the winding[J]. High Voltage Engineering,2004,30(10):46-48.
- [19] 贾云飞,汲胜昌,李金忠,等.变压器油中工频电弧特性 及变压器防爆研究综述[J].中国电机工程学报,2024,44 (7):2910-2927.

JIA Yunfei,JI Shengchang,LI Jinzhong,et al.Overview on the characteristics of power frequency arc in transformer oil and transformer explosion protection[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(7):2910-2927.

- [20] 陈彬,席彬晟,李学宝,等.纳米晶铁心中频变压器磁-结构 场耦合数值模拟[J].高压电器,2024,60(1):172-181+204.
   CHEN Bin, XI Binsheng, LI Xuebao, et al. Magneticstructural field coupling numerical simulation of medium-frequency transformer with nanocrystalline core
   [J].High Voltage Apparatus,2024,60(1):172-181+204.
- [21] ZHOU H, HONG K X, HUANG H, et al. Transformer winding fault detection by vibration analysis methods[J]. Applied Acoustics,2016,114:136-146.
- [22] 王熙文.基于数字孪生电力变压器绕组故障诊断技术 研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2022.
   WANG Xiwen. Research on fault diagnosis technology of power transformer winding based on digital twin[D].
   Shenyang:Shenyang University of Technology,2022.
- [23] 陈忠贤,谢虎波,任文军,等.基于FBG的35kV油浸式变压 器绕组变形监测研究[J].智慧电力,2023,51(1):115-122. CHEN Zhongxian,XIE Hubo,REN Wenjun,et al.35 kV oil immersed transformer winding deformation monitoring based on FBG[J].Smart Power,2023,51(1):115-122.
- [24] 冀茂,齐波,郑伟,等.变压器典型绕组缺陷的漏磁分布规律 及编码辨识方法研究[J].电网技术,2024,48(5):2133-2142.
   JI Mao, QI Bo, ZHENG Wei, et al. Coding diagnosis method based on leakage distribution law under typical winding defects of transformers[J]. Power System Technology,2024,48(5):2133-2142.
- [25] 刘建锋,刘梦琪,董倩雯,等.基于改进VMD去噪和优化 ELM方法的变压器早期故障诊断[J].电力科学与技术 学报,2023,38(6):55-66.

LIU Jianfeng, LIU Mengqi, DONG Qianwen, et al. Transformer early fault diagnosis based on improved VMD denoising and optimized ELM method[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(6):55-66.

[26] 杨帆,张相杰,王鹏博,等.特高压并联电抗器铁芯振动 及噪声特征研究[J].高电压技术,2024,50(2):725-736. YANG Fan, ZHANG Xiangjie, WANG Pengbo, et al. Study on the vibration and noise characteristics of the iron core in ultra-high voltage shunt reactor[J]. High Voltage Engineering,2024,50(2):725-736.

[27] 张宏杰,陈贵凤,闫宏伟,等.基于 SMOTE 与 Bayes 优化的 LSTM 网络变压器故障诊断[J].中国电力,2023,56 (10):164-170.

ZHANG Hongjie, CHEN Guifeng, YAN Hongwei, et al. Fault diagnosis of LSTM network tansformer based on SMOTE and Bayes optimization[J].Electric Power, 2023, 56(10):164-170.

[28] 袁发庭,姬睿氢,吕凯,等.考虑硅钢片磁致伸缩特性的 干式铁芯电抗器铁芯振动分析及优化[J].高电压技术, 2023,49(4):1486-1494.

YUAN Fating, JI Ruiqing, LÜ Kai, et al. Vibration analysis and optimization of dry-type core reactor with silicon steel sheet magnetostrictive model[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1486-1494.

[29] 袁发庭,陈步康,陈炜,等.基于电磁-结构力场耦合的铁芯电抗器振动特性分析及优化方法[J].高电压技术,2023,49(6):2374-2385.
 YUAN Fating, CHEN Bukang, CHEN Wei, et al. Vibration

characteristic analysis and optimization method of iron core reactor based on electromagnetic-structural force field coupling [J].High Voltage Engineering,2023,49(6):2374-2385.

 [30] 江进波,王佳栋,程廷强,等.基于场路耦合方法的 100kV脉冲变压器设计与磁饱和特性[J].高电压技术, 2022,48(12):4893-4903.
 JIANG Jinbo, WANG Jiadong, CHENG Tingqiang, et al.

Design of a 100 kV pulse transformer based on fieldcircuit coupling method and its magnetic saturation characteristics research[J]. High Voltage Engineering, 2022,48(12):4893-4903.

- [31] 师偷航,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.
- [32] 王晓磊,王浠铭,阎卫东,等.基于Copula函数的水平和竖向地 震动强度参数相关性分析[J].工程力学,2023,40(5):79-92.
   WANG Xiaolei, WANG Ximing, YAN Weidong, et al. Correlation analysis of intensity measures of horizontal and vertical ground motions based on copula function[J]. Engineering Mechanics,2023,40(5):79-92.
- [33] 张帅龙,郑可迪,刘学,等.基于藤 Copula 理论的海上风
   电建模及电力市场运行分析[J].电力系统自动化,2024,
   48(11):134-142.
   ZHANG Shuailong, ZHENG Kedi, LIU Xue, et al. Modeling

of offshore wind power based on vine copula theory and electricity market operation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(11):134-142.