

# 基于振动信号的油浸式铁心电抗器典型缺陷诊断方法研究

孟令明<sup>1</sup>, 高树国<sup>1</sup>, 张玉焜<sup>2</sup>, 柳树青<sup>2</sup>, 汲胜昌<sup>2</sup>, 田源<sup>1</sup>, 张宁<sup>3</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄 050021; 2. 西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 3. 国网河北省电力有限公司检修分公司, 石家庄 050021)

**摘要:** 油浸式铁心电抗器正常运行期间其振动由绕组受力、铁心磁致伸缩效应以及铁心饼间的麦克斯韦力导致。通过构建电抗器磁—固耦合三维模型, 对电抗器在3种载荷作用下的轴向及径向振动响应分布进行分析。在此基础上搭建电抗器振动试验平台获取了电抗器箱体振动信号, 通过调整铁心轴向压紧力, 对箱体振动信号进行采集, 通过提取各机械状态下的振动频谱特征可知, 随着电抗器铁心轴向压紧力降低, 箱体振动信号频谱发生变化, 采用3种贝叶斯优化的网络分类器模型, 对不同压紧力下的机械状态进行识别, 准确率分别达到了94.5%、94.2%与95.0%, 进一步验证了频谱特征结合优化算法对电抗器铁心松动判断的高效性。

**关键词:** 铁心电抗器; 磁—固耦合; 振动响应; 频谱特征

## Research on Typical Defect Diagnosis Method of Oil-immersed Iron Core Reactor Based on Vibration Signal

MENG Lingming<sup>1</sup>, GAO Shuguo<sup>1</sup>, ZHANG Yukun<sup>2</sup>, LIU Shuqing<sup>2</sup>, JI Shengchang<sup>2</sup>,  
TIAN Yuan<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>3</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Institute of Electric Power Science, Shijiazhuang 050021, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Overhaul Branch Company, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** During the normal operation of the oil-immersed iron core reactor, its vibration is caused by the winding stressing, the magnetostrictive effect of the iron core and the Maxwell force between the iron cores. The axial and radial vibration response distributions of the reactor under three loads are analyzed by constructing a three-dimensional model of the magnetic-solid coupling of the reactor. On this basis, a reactor vibration test platform is set up to obtain the vibration signal of the reactor housing. The vibration signal of the housing is collected by adjusting the axial compression force of the iron core. It is known by extracting the vibration spectrum characteristic under various mechanical states that with the reduction of the axial compression force of the reactor core, the vibration signal spectrum of the housing is changed. Three kinds of Bayesian optimized network classifier models are adopted to identify the mechanical state under different compression forces, and the accuracy rate has reached 94.5%, 94.2% and 95.0% respectively, and the high efficiency of the spectrum feature in combination with the optimization algorithm for the looseness judgement of the reactor core is verified further.

**Key words:** core reactor; magnetic-solid coupling; vibration response; spectral features

## 0 引言

高压并联电抗器在电力系统远距离传输线路

中起着关键作用<sup>[1-4]</sup>, 由于铁心柱中存在气隙等特殊结构, 因此相比等容量的变压器, 其内部结构及箱体表面振动强度更加显著。长期振动效应下, 电抗

收稿日期: 2024-08-25; 修回日期: 2024-11-03

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(5200-201913054A-0-0-00)。

Project Supported by State Grid Corporation Limited Headquarters Technology Project(5200-201913054A-0-0-00).

器内部将不可避免地出现结构件松动等机械缺陷, 电抗器在缺陷状态下虽能继续运行, 但其强烈的本体振动势必导致缺陷恶化、设备性能下降等问题<sup>[5-8]</sup>, 因此对高压并联电抗器箱体内部和外部的应力分布、振动特性加以关注和研究, 分析机械结构变化对在运电抗器振动的影响, 在一定程度上可以为高压并联电抗器的缺陷诊断和减振降噪提供参考。

目前, 国内外对电力变压器等部分电力设备的振动机理及振动特性的研究已相对成熟<sup>[9-15]</sup>, 在此基础上, 对于结构相似的铁心电抗器, 通过仿真和试验的手段对高压并联电抗器的振动机理研究也得到了突破与验证。在仿真研究方面, 文[16]中建立基于多物理场耦合的电抗器仿真模型, 以场—路耦合产生的电磁力为载荷, 求取电抗器振动速度; 文[17]中将不同电压激励下并联电抗器与变压器模型铁心振动情况进行对比分析; 文[18]中采用多物理场耦合的方法对电抗器结构应力和声压级进行计算, 证实了多物理场分析方法可用于电抗器设计阶段对铁心噪声进行预估。在试验研究方面, 文[19]中计算得到不同工况下并联电抗器的振动位移、加速度的空间分布, 分析了麦克斯韦力和磁致伸缩效应对并联电抗器铁心振动的影响; 文[20]中对高压并联电抗器进行了振动信号与声学信号的测量, 为变电站声源参数提供了参考。

文中结合多物理场有限元仿真与振动实验平台对一台 35 kV 电抗器的振动特性进行分析。基于磁—固耦合方法分析了电抗器在绕组振动、铁心磁致伸缩以及铁心饼间的电磁力 3 种载荷作用下其轴向与径向振动分布; 通过电抗器振动实验平台获取了电抗器箱体振动信号, 实验结果表明, 不同机械状态下的振动频谱分布发生不同程度变化, 同时依据该频谱特征采用朴素贝叶斯网络分类器模型对穿心拉杆不同预紧力下的机械状态进行识别。文中研究结果对于明确铁心电抗器振动机理与典型缺陷下振动特征具有重要意义。

## 1 电抗器模型与多物理场耦合方法

由于油浸式铁心电抗器体型庞大、结构复杂, 振动传感器不便于深入油箱内部, 因此其箱体内部振动情况难以获取; 同时在电抗器运行期间, 各种结构振源无法作为运行单元单独振动。因此针对该问题, 采用多物理场耦合的有限元分析方法可有效解决<sup>[21-22]</sup>, 并提供电抗器箱体内部结构各部位的应力分布与振动特性, 为实际工程应用提供参考。

### 1.1 单相电抗器三维模型

文中根据 35 kV 铁心电抗器的实体结构尺寸进行仿真分析, 该实体模型的铁心由冷轧取向硅钢片组成, 绕组采用导电性能良好的扁铜导线。为了减小附加损耗, 夹件、拉杆等金属构件采用低磁钢或无磁钢材料。对于有限元仿真的三维模型, 若模型中自由度数量过多会导致计算时间过长, 因此将绕组等效为与实际结构尺寸相同的圆筒状结构, 将气隙中分布式的石饼结构通过等效截面简化为一体结构, 模型见图 1。

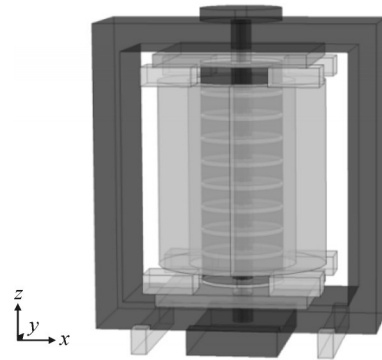


图 1 铁心电抗器模型

Fig. 1 Core reactor model

铁心柱由 9 块铁心饼组成, 为减小漏磁含量, 两端的铁心柱厚度增大, 并在两端设置了一定宽度的磁分路, 各铁心饼之间存在等效截面积的气隙垫块, 气隙总高度满足电抗值的需求。绕组以圆筒状包围在铁心柱外部, 端部均有木材垫块支撑, 穿心拉杆穿过铁轭、铁心饼以及气隙起到各结构的轴向固定作用。该电抗器的基本参数见表 1。

表 1 高压并联电抗器主要参数

Table 1 Main parameters of high voltage shunt reactor

参数名称	参数值
型号	BKDJ-3000/35
型式	单相油浸式
额定容量/kvar	3 000
额定电压/kV	35
额定电流/A	148.5
实测电抗/ $\Omega$	136.1
磁通密度/T	1.2~1.3

### 1.2 磁—固耦合仿真模型

基于电抗器几何模型, 对其各结构设置材料参数、添加所需物理场并设置相关边界条件, 流程见图 2。铁心、绕组、气隙材料分别为 B30P100 型硅钢片、铜线以及大理石, 变压器油采用 I-20℃ 型的绝缘油。模型材料参数见表 2。

在磁场作用下, 通电绕组所受的电磁力、硅钢

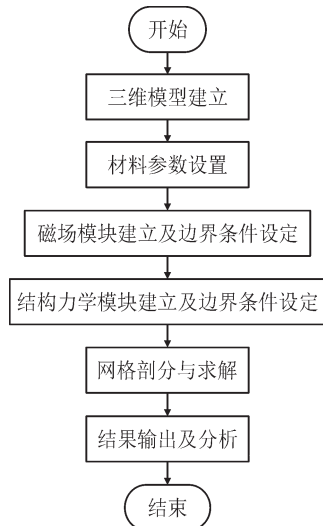


图2 有限元仿真流程

Fig. 2 Finite element simulation process

表2 模型材料参数

Table 2 Model material parameters

材料参数	铁心	绕组	气隙	紧固件	油
相对磁导率	7 000	1	1	1	1
泊松比	0.30	0.45	0.38	0.30	—
杨氏模量/Pa	1.2×10 <sup>11</sup>	1.1×10 <sup>11</sup>	1.7×10 <sup>9</sup>	2.0×10 <sup>11</sup>	—
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 870	8 700	2 000	7 850	895

片由于磁致伸缩产生的应变以及铁心饼间的吸引力可分别表示为:

$$F = J \times B \quad (1)$$

$$\lambda_i = \frac{3}{2} \lambda_s \left( \frac{M_i}{M_s} \right)^2 \quad (2)$$

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (3)$$

式(1)中,对于绕组所受电磁力, $J$ 和 $B$ 分别为电流密度和磁通密度;式(2)中,对于铁心由磁致伸缩导致的应变, $\lambda_s$ 表示磁致伸缩常数, $M_i$ 和 $M_s$ 分别表示沿着 $i$ 方向的磁化强度和饱和磁化强度;式(3)中,对于铁心饼所受的麦克斯韦力, $B$ 和 $S$ 分别表示磁通密度和磁通通过铁心上下表面的截面积。

## 2 仿真结果分析

### 2.1 磁通密度分布

设定电抗器绕组通过的电流大小为额定电流的峰值,获取峰值时刻电抗器箱体的磁通密度分布,铁心中的磁路流通情况见图3。主磁通流过铁心柱气隙时分成两个并联支路,其一是竖直流过气隙截面的磁通,其二是绕过气隙的衍射磁通,主磁通到达磁分路处分别向旁轭分散形成并联回路。选取铁心旁轭中部位置的截面为参考,根据电势与磁通的关系 $U=4.44fNBS$ 可知,此处磁通密度为1.2 T,

而仿真计算结果中该部位的磁通密度为1.17 T,与理论计算值误差不超过3%。

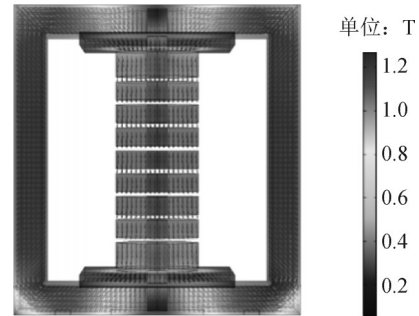


图3 磁通密度分布

Fig. 3 Flux density distribution

以100 A作为起点,以10 A为步长分别对绕组施加电流,获取铁心柱中心、旁轭中心以及上铁轭中心部位的磁通密度。磁通密度—电流变化趋势见图4。如图4所示,该位置的磁通密度与电流成正比相关。由于主磁通在上轭处分为两路,以及磁分路的存在,上轭中间1/3处的磁通密度相对较小。相比于旁轭的结构完整性,心柱由于存在气隙,因此其磁通密度略小。以上3个部位磁通密度大小各不相同,但都随着电流的升高而线性增大。

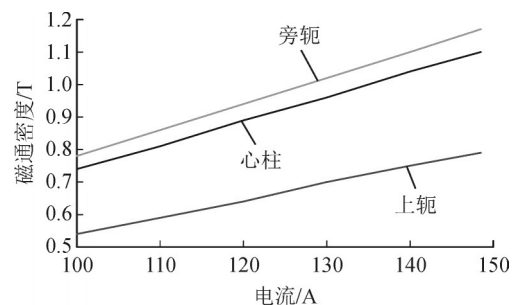


图4 磁通密度—电流变化趋势

Fig. 4 Flux density-current trend

### 2.2 电抗器振动分布

通过构建磁场—固体力学耦合的电抗器仿真模型,以交变磁场对通电绕组及铁心作为激励,获取电抗器结构振动分布与振动特性。

#### 2.2.1 绕组振动及其对本体振动影响

以洛伦兹力作为体载荷施加到绕组上,可获取绕组在磁场与洛伦兹力耦合下的振动以及局部结构件的受迫振动见图5、6。

绕组单独振动时,其内径所受应力相比外径更大,这是因为内径处的漏磁场相对密集。绕组本身的轴向振动幅值与径向振动幅值相差并不大,轴向与径向振动幅值最大的区域均出现在绕组底部垫块处,分别达到0.22 m/s<sup>2</sup>和0.17 m/s<sup>2</sup>。

#### 2.2.2 铁心振动及其对本体振动影响

以铁心作为磁致伸缩材料,可获取铁心在磁场

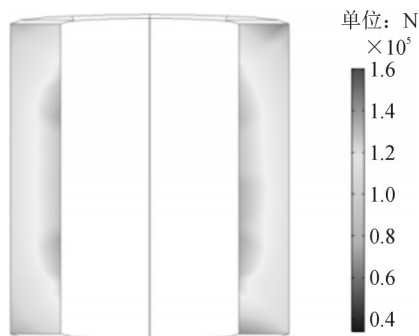
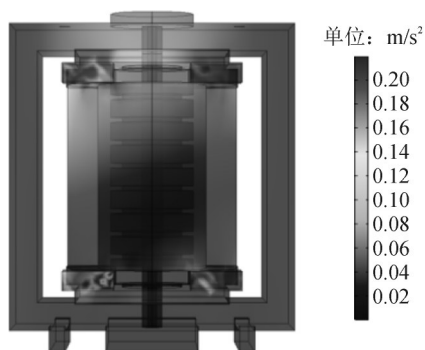
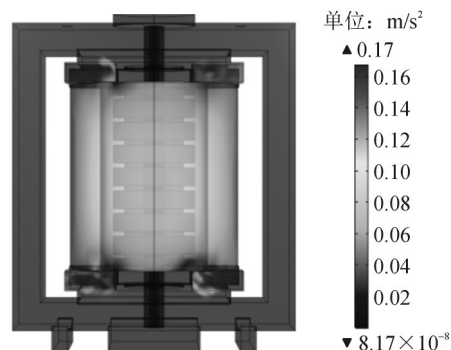


图5 绕组截面受力

Fig. 5 Force on winding section



(a) 电抗器轴向振动



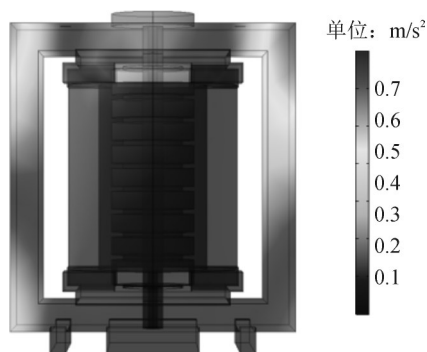
(b) 电抗器径向振动

图6 绕组振动作用下电抗器振动响应

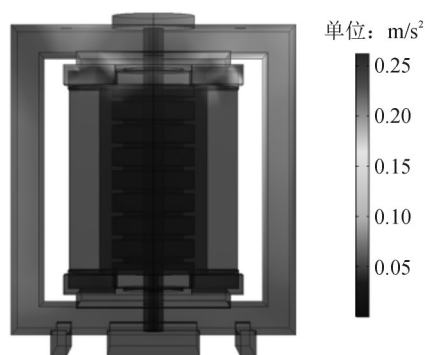
Fig. 6 Vibration response of reactor under winding vibration

与磁致伸缩耦合下的振动以及电抗器其余结构件的受迫振动, 振动分布见图7。磁致伸缩导致的振动主要体现在旁轭上半部分, 且轴向振动相对突出, 最高幅值达到  $0.7 \text{ m/s}^2$ , 为进一步降低由磁致伸缩导致的铁心振动响应, 可考虑在旁轭处固定四周拉杆以降低振动幅值。

相比于气隙处的电磁力强度, 硅钢片接缝处的电磁力可忽略不计。以麦克斯韦力作为面载荷施加到与气隙垫块紧贴的铁心饼表面, 由于主磁通沿着铁心饼截面法向分量最大, 因此麦克斯韦力的面载荷主要以轴向为主。磁场对铁心饼的激励导致的电抗器振动情况见图8, 轴向振动幅值最高达到  $0.9 \text{ m/s}^2$ , 径向振动幅值最高达到  $0.75 \text{ m/s}^2$ 。



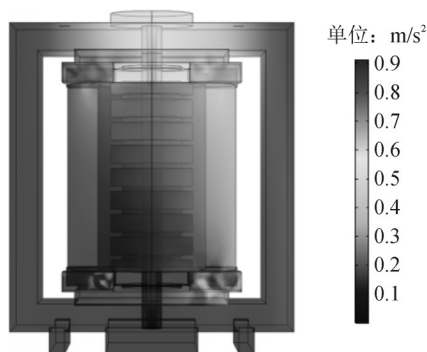
(a) 电抗器轴向振动



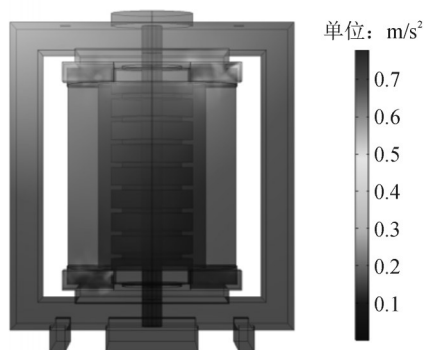
(b) 电抗器径向振动

图7 磁致伸缩作用下电抗器振动响应

Fig. 7 Vibration response of reactor under magnetostriction



(a) 电抗器轴向振动



(b) 电抗器径向振动

图8 麦克斯韦力作用下电抗器振动响应

Fig. 8 Vibration response of reactor under Maxwell force

### 2.2.3 电流幅值对本体振动的影响

根据电抗器振动机理可知,绕组和铁心振动幅值随电流升高而增大<sup>[23-24]</sup>,但由于结构材料各异且振动传播路径不同,因此不同区域的振动信号随电流变化趋势不是完全一致的。除此之外,电抗器结构件的机械状态也能影响电抗器振动特性<sup>[25-26]</sup>,文中通过调整气隙垫块刚度,对比电抗器在各振源单独作用下的振动响应。

以100 A作为起点,以10 A为步长分别对绕组施加电流,电抗器上铁轭、旁轭以及铁心柱中心处的磁致伸缩效应随电流平方的变化趋势见图9,在相同电流水平下,磁致伸缩效应下的上铁轭振动加速度幅值更大,与图7中电抗器本体振动分布相符。

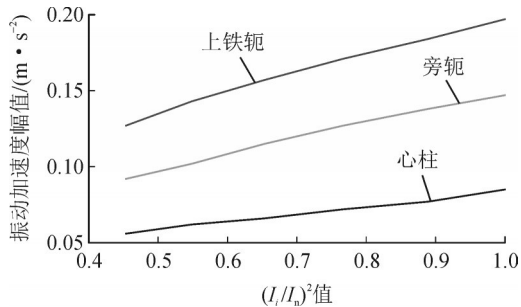


图9 磁致伸缩作用下的振动随电流升高的变化趋势  
Fig. 9 Variation trend of vibration with increasing current under magneto-striction

电抗器中心铁心饼的内、外表面以及其上表面在麦克斯韦力作用下的振动加速度幅值随电流平方的变化趋势见图10。在相同电流水平下,铁心饼内表面的振动幅值在一定程度上大于外表面,铁心饼在长期应力不均的状况下,不可避免地导致铁心饼发生内应力并产生局部发热。

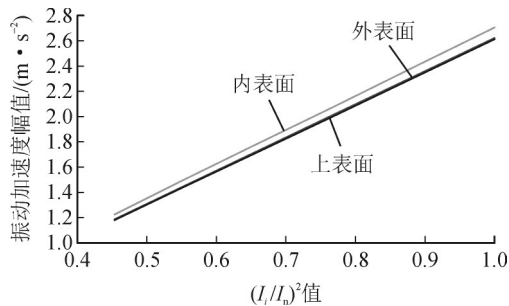


图10 麦克斯韦力作用下的振动随电流升高的变化趋势  
Fig. 10 Change trend of vibration with increasing current under Maxwell force

## 3 电抗器箱体振动信号采集与分析

为分析电抗器实体振动信号,文中搭建了电抗

器振动实验平台。电抗器振动测量试验平台主要由电源、调压器、升压变压器、补偿电容以及高压并联电抗器组成。高压并联电抗器振动测量装置的硬件主要包含振动传感器、线缆、采集装置与数据接收终端。其中振动传感器采用压电式,通过磁座固定于油箱表面;信号传输线具有磁屏蔽功能,抵抗周边复杂环境的干扰。

### 3.1 振动信号采集装置

根据高压并联电抗器振动机理分析和以往的测量分析经验,电抗器内部振源振动频率以100 Hz为主,且已知的35 kV油浸式并联电抗器箱体振动幅值最大不超过30 m/s<sup>2</sup>。因此在获取振动信号时系统采用PCB603C01压电式加速度传感器测量,压电式加速度振动传感器参数见表3。

表3 传感器参数

Table 3 Sensor parameters

参数	数值
灵敏度/(mV·g <sup>-1</sup> )	100
量程/g	±50
安装方式	磁式吸附
频带/kHz	5~10
应用温度/°C	54~121

采集卡内建4个通道同步采样模拟输入,适合应用于数据采集和振动测量,能够为带电设备提供24 h振动监测。实际采用的在线监测系统框架见图11,该系统多通道可用于采集振动信号,并且具备对采集数据进行边缘处理、云存储的能力。

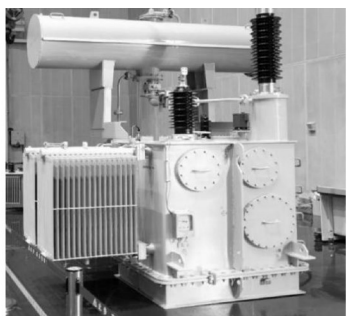


图11 振动信号监测系统

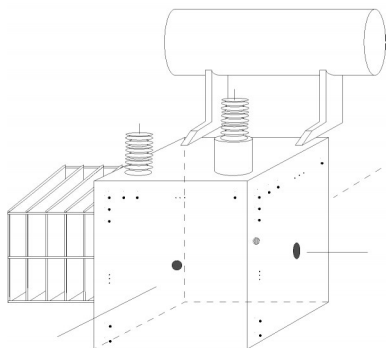
Fig. 11 Vibration signal monitoring system

### 3.2 振动信号分析

由于电抗器内部结构件对称,且为了避免本体四周金属夹紧结构件的影响,原则上应尽可能选择中部区域作为测试区域。风扇等散热系统工作期间其振动信号处于低频,因此测量区域应远离散热系统。此外,大多数电抗器箱壁还存在加强筋,以降低振动水平,振动信号通过加强筋向外传播会有一定程度的衰减,从而信噪比降低。综合考虑,测点位置选择在除散热面所在平面的另外3个箱壁表面,文中电抗器模型及振动信号测量位置见图12。



(a) 电抗器实体模型

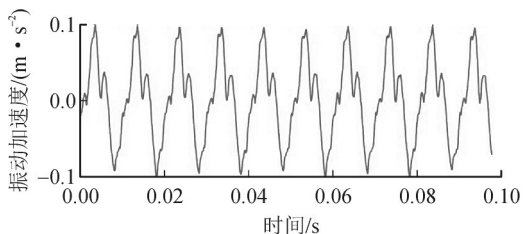


(b) 测试位置

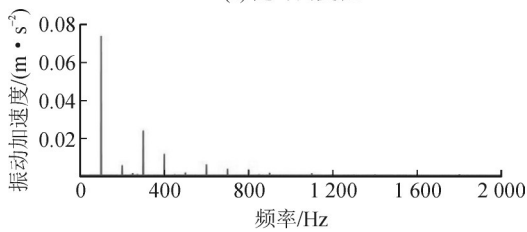
图 12 电抗器实体模型和测量位置

Fig. 12 Reactor solid model and measuring point

文中实验用电抗器的局部有效质量远大于磁吸式振动传感器的质量,采用磁吸式振动传感器不会对油箱表面的模态产生影响。电抗器箱体表面振动信号见图 13。



(a) 随时间变化



(b) 随频率变化

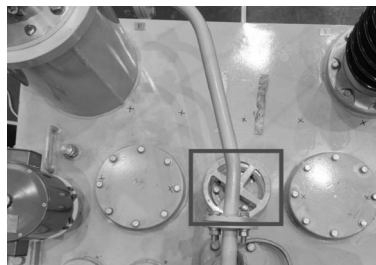
图 13 电抗器箱体表面振动信号

Fig. 13 Vibration signal of reactor box surface

### 3.3 铁心轴向松动对电抗器振动的影响

根据电抗器振动仿真结果可知,随着气隙刚度降低,电抗器振动幅值存在一定程度的上升。为模拟电抗器铁心轴向松动,文中采用的电抗器实体模型中加装了穿心拉杆传动机构,见图 14(a),转动箱体顶部转盘,可对穿心拉杆松动程度进行调整,同

时箱壁四周设置了手孔,便于调整本体四周夹件的松动程度,见图 14(b)。



(a) 传动机构



(b) 紧固结构

图 14 电抗器传动机构和紧固结构

Fig. 14 Reactor transmission mechanism and fastening structure

通过旋转穿心拉杆传动机构改变铁心预紧力,铁心轴向压紧力分别设为原本的 95%、90%以及 85%,且分别视为状态 2、状态 3 与状态 4。对 3 种机械状态下的箱体振动信号进行采集对比,以测点 1 为例,信号频谱见图 15。电抗器在原本压紧状态下,主频率为 100 Hz,存在微量的倍频谐波。随着压紧程度的降低,倍频谐波也逐渐明显,表明当铁心柱存在轴向松动时,电抗器振源形式发生变化,同时在作为固体传播路径的压紧装置的固有模式也发生改变,因此到达箱壁的振动响应特征也存在明显偏移。

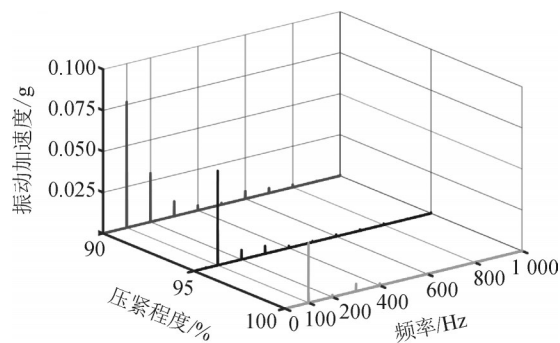


图 15 不同压紧程度下电抗器振动频谱

Fig. 15 Reactor vibration spectrum under different compression levels

### 3.4 基于频谱能量占比的铁心松动故障诊断方法

在轻微松动下,仅从较小变化的振动波形与频谱很难判断电抗器内部机械状态,提出基于频率能量占比的欧式距离能更好的反映电抗器内部松动变化趋势。由图 15 可知,电抗器振动信号主要分布于 0~1 000 Hz 范围内,提取 50 Hz 及其倍数频率计

算总能量。

$$E = \sum_{i=1}^n E_{50 \times i} = \sum_{i=1}^n A_{50 \times i}^2 \quad (4)$$

式(4)中： $A_{50 \times i}$ 为 $50 \times i$  Hz 频率幅值； $E_{50 \times i}$ 为 $50 \times i$  Hz 频率能量。

划分5个频率带，分别为A[0, 100]、B(100, 200]、C(200, 300]、D(300, 400]、E(400, 1000]，对能量做归一化处理并计算能量占比，表达式见式(5)。形成能量占比特征量 $[E_1, E_2, E_3, E_4, E_5]$ ，见图16，通过欧式距离判断电抗器内部松动变化规律，以状态1为基准参量 $E'$ ，表达式见式(6)。

$$\begin{cases} E_i = \frac{E_{50 \times (2i-1)} + E_{50 \times 2i}}{E} \\ E_5 = \frac{\sum_{i=9}^n E_{50 \times i}}{E} \end{cases} \quad (5)$$

$$L = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - E'_i)^2} \quad (6)$$

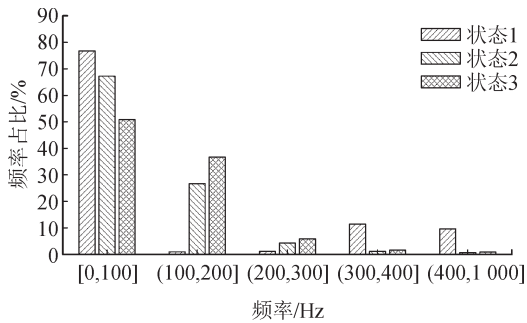


图16 不同压紧程度下电抗器频率占比

Fig. 16 Ratio at different compression levels

不同机械状态下的欧式距离见表4。由表4可知，对于同一测点，穿心拉杆的松动程度在一定程度上影响着电抗器箱体振动频谱分布，随着松动程度增大，振动基频能量占比逐渐降低，高频能量占比逐渐升高，从而导致欧式距离逐渐增大，且能够很好的反映电抗器内部机械状态变化过程。此外，文中采用基于贝叶斯优化(BO)的朴素贝叶斯(NBs)、支持向量机(SVM)及K-近邻算法(KNN)分别对包含频谱能量占比的数据样本进行分类，分类情况见图17。3种分类器的平均分类准确率分别为94.5%、94.2%与95.0%，其中BO-KNN整体分类效果较好。因此，对电抗器实施长期振动在线监测，通过描绘基于频谱能量占比的变化规律，并结合优化分类模型对数据样本进行识别的方法，可作为电抗器穿心拉杆松动缺陷的检测手段，该方法能够反映电抗器内部由穿心拉杆松动导致的机械状态变化。

表4 不同机械状态下的欧式距离

Table 4 Euclidean distance in different mechanical states

特征量	状态1	状态2	状态3	状态4
$E_1$	0.709 1	0.579 2	0.226 5	0.198 0
$E_2$	0.214 4	0.351 2	0.274 1	0.107 6
$E_3$	0.058 9	0.015 4	0.295 8	0.378 5
$E_4$	0.003 3	0.008 8	0.045 1	0.032 1
$E_5$	0.014 3	0.045 4	0.158 5	0.283 9
$L$	0.000 0	0.039 3	0.224 0	0.394 7

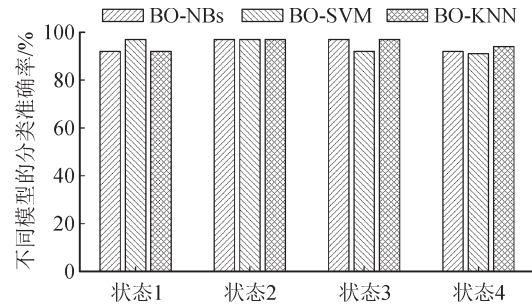


图17 不同模型分类准确率对比

Fig. 17 Comparison of classification accuracy of different models

## 4 结论

文中采用磁—固耦合仿真和振动试验测量的方式对油浸式铁心电抗器的振动特性进行分析，并对穿心拉杆松动状态进行诊断，得到如下结论：

1)35 kV 油浸式铁心电抗器振动在铁心的磁致伸缩效应和麦克斯韦力作用下响应明显，即磁致伸缩和麦克斯韦力是该电抗器箱体的主要振动来源。

2)电抗器铁心关键部位的振动加速度幅值与电流平方基本呈线性关系，对比不同机械状态下电抗器振动信号。通过调整电抗器实体模型的铁心轴向压紧力，随着压紧力的降低，倍频谐波也逐渐明显。

3)随着松动程度增大，振动基频能量占比逐渐降低，高频能量占比逐渐升高，从而导致欧式距离逐渐增大，且能够很好的反映电抗器内部机械状态变化过程。

4)基于频谱能量占比的变化规律，并结合3种贝叶斯优化分类模型，可达到94.5%、94.2%与95.0%的状态识别准确率，该方法可准确反映电抗器内部机械状态。

## 参考文献：

[1] 徐宁,王莹,许文超. 高压串联电抗器在南京220 kV电网中的应用分析[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(5):34-36.  
XU Ning, WANG Ying, XU Wenchao. Analysis of the per-

- formance of high voltage series reactor in Nanjing 220 kV power grid[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2015, 34(5): 34-36.
- [2] 朱恩泽, 陈习文, 王相锋, 等. 1 000 kV 特高压并联电抗器色谱异常原因分析与处理[J]. *变压器*, 2023, 60(1): 59-63.  
ZHU Enze, CHEN Xiwen, WANG Xiangfeng, et al. Analysis and treatment of oil chromatography abnormal in 1 000 kV UHV shunt reactor[J]. *Transformer*, 2023, 60(1): 59-63.
- [3] 陈哲, 何柳, 李双伟. 并联电抗器降损成效分析及节电量简化计算方法[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2023, 44(2): 18-24.  
CHEN Zhe, HE Liu, LI Shuangwei. Effect analysis of loss reduction and simplified calculation method of power saving for shunt reactor[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2023, 44(2): 18-24.
- [4] 王果, 雷武, 闵永智, 等. 改进 EEMD 算法在高压并联电抗器声信号去噪中的应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(24): 164-174.  
WANG Guo, LEI Wu, MIN Yongzhi, et al. Application of an improved EEMD algorithm in high voltage shunt reactor sound signal denoising[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(24): 164-174.
- [5] 汪先进, 周凯, 赵世林, 等. 不同材料对变电站内三相空心电抗器磁场干扰的屏蔽效果研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(4): 150-156.  
WANG Xianjin, ZHOU Kai, ZHAO Shilin, et al. Research for magnetic shielding effect of 3-phase air core reactor in substation by using different materials[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(4): 150-156.
- [6] 徐永明, 郭蓉, 张洪达. 电力变压器绕组短路电动力计算[J]. *电机与控制学报*, 2014, 18(5): 36-42.  
XU Yongming, GUO Rong, ZHANG Hongda. Calculation of electrodynamic force with winding short-circuit in power transformers[J]. *Electric Machines and Control*, 2014, 18(5): 36-42.
- [7] 赵汉武, 钱国超, 胡锦, 等. 一起 500 kV 高压并联电抗器异常振动的原因分析及处理[J]. *变压器*, 2023, 60(10): 68-71.  
ZHAO Hanwu, QIAN Guochao, HU Jin, et al. Analysis and treatment of abnormal vibration of 500 kV high-voltage shunt reactor[J]. *Transformer*, 2023, 60(10): 68-71.
- [8] 朱明, 黄勤清, 齐用卡, 等. 基于振动信号总离散频谱的高压并联电抗器健康评估方法[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(8): 114-120.  
ZHU Ming, HUANG Qinqing, QI Yongka, et al. Healthy assessment method of high voltage shunt reactor based on total discrete spectrum of vibration signal[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(8): 114-120.
- [9] 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.
- [10] ZHANG Pengning, LI Lin, CHENG Zhiguang, et al. Study on vibration of iron core of transformer and reactor based on Maxwell stress and anisotropic magnetostriction[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, 55(2): 1-5.
- [11] 屈斌, 张利, 王永宁, 等. 基于振动信号的 GIS 机械松动与局部放电诊断方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(2): 98-106.  
QU Bin, ZHANG Li, WANG Yongning, et al. Study of mechanical looseness and partial discharge diagnoses of GIS based on vibration signals[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(2): 98-106.
- [12] 韩学, 宋文乐, 刘杨, 等. 不同铁磁材料变压器铁芯磁致伸缩及振动噪声特性分析[J]. *大电机技术*, 2023(1): 68-73.  
HAN Xue, SONG Wenle, LIU Yang, et al. Analysis of magnetostrictive vibration and noise performance in transformers with different iron core materials[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2023(1): 68-73.
- [13] 李唐兵, 童涛, 席儒, 等. 直流偏磁下的电力变压器振动特性研究[J]. *变压器*, 2023, 60(3): 52-58.  
LI Tangbing, TONG Tao, XI Ru, et al. Research on vibration characteristics of transformer under DC bias[J]. *Transformer*, 2023, 60(3): 52-58.
- [14] 刘道生, 李泽帅, 李鹏, 等. 变压器振动特性分析及其降噪技术研究综述[J]. *变压器*, 2023, 60(7): 18-27.  
LIU Daosheng, LI Zeshuai, LI Peng, et al. Review of characteristics analysis on vibration and technology research on reducing noise of transformers[J]. *Transformer*, 2023, 60(7): 18-27.
- [15] 张煦, 曹辰, 路敦林, 等. 基于电—磁—结构多信息耦合的变压器振动特性仿真与试验[J]. *变压器*, 2023, 60(7): 51-58.  
ZHANG Xu, CAO Chen, LU Dunlin, et al. Simulation and testing of transformer vibration characteristics coupling of multiple information based on electromagnetic structure[J]. *Transformer*, 2023, 60(7): 51-58.
- [16] 吴书煜, 马宏忠, 姜宁, 等. 基于多物理场耦合的特高

- 压并联电抗器振动噪声仿真分析与实验研究[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 122-127.
- WU Shuyu, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Simulation analysis and experimental research on vibration and noise of UHV shunt reactor based on multi physical field coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 122-127.
- [17] 张鹏宁, 李琳, 程志光, 等. 并联电抗器与变压器模型铁心振动仿真与试验对比[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5273-5281.
- ZHANG Pengning, LI Lin, CHENG Zhiguang, et al. Vibration simulation and experiment comparison of shunt reactor and transformer model core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5273-5281.
- [18] 刘骥, 张明泽, 李凯, 等. 电抗器铁芯振动噪声的多场耦合分析方法[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(9): 17-25.
- LIU Ji, ZHANG Mingze, LI Kai, et al. Multi field coupling research on iron-core vibration noise of power reactor[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(9): 17-25.
- [19] 张鹏宁, 李琳, 聂京凯, 等. 考虑铁心磁致伸缩与绕组受力的高压并联电抗器振动研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3130-3139.
- ZHANG Pengning, LI Lin, NIE Jingkai, et al. Study on the vibration of high voltage shunt reactor considering of magnetostriction and winding force[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3130-3139.
- [20] 周兵, 王延召, 胡静竹, 等. 并联电抗器振动特性及声功率级计算[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3685-3692.
- ZHOU Bing, WANG Yanzhao, HU Jingzhu, et al. Vibration characteristics and acoustic power level calculation of shunt reactors[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3685-3692.
- [21] 田聪, 李琳, 宋雅吾, 等. 并联电抗器铁心振动的模型实验与仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(3): 64-70.
- TIAN Cong, LI Lin, SONG Yawu, et al. Model experiment and simulation of core vibration for shunt reactor[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(3): 64-70.
- [22] 律方成, 郭佳熠, 程涣超, 等. 计及铁心叠片规则与流—固耦合的特高压并联电抗器铁心振动计算方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 802-810.
- LYU Fangcheng, GUO Jiayi, CHENG Huanchao, et al. Calculation of UHV shunt reactor core vibration considering core lamination rules and fluid-solid coupling[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 802-810.
- [23] 祝令瑜, 沈琪, 汲胜昌, 等. 基于振动测量的电容器装置噪声贡献分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(4): 13-17.
- ZHU Lingyu, SHEN Qi, JI Shengchang, et al. Noise contribution analysis of capacitor installations based on measured vibration data[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(4): 13-17.
- [24] 谭黎军, 陈洪波, 欧强, 等. 特高压并联电抗器运行振动与噪声特性研究[J]. 变压器, 2016, 53(7): 43-46.
- TAN Lijun, CHEN Hongbo, OU Qiang, et al. Research on vibration and noise characteristics of UHV shunt reactor[J]. Transformer, 2016, 53(7): 43-46.
- [25] 郭佳熠, 耿江海, 律方成, 等. 气隙结构对特高压并联电抗器铁芯振动的影响[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 211-217.
- GUO Jiayi, GENG Jianghai, LYU Fangcheng, et al. Influence of air gap structure on core vibration of UHV shunt reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 211-217.
- [26] 官瑞杨, 魏新劳, 王永红, 等. 铁心电抗器气隙边缘效应计算及影响因素[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(4): 81-88.
- GUAN Ruiyang, WEI Xinlao, WANG Yonghong, et al. Calculation and influence factors of air-gap edge effect of iron-core reactor[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(4): 81-88.
- 孟令明(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力设备状态评价与检测方面研究。
- 柳树青(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事电力设备状态监测与故障诊断方面研究(通信作者)(E-mail: liushu\_qing@qq.com)。