

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104791

# 基于 COMSOL 的变压器铁心振动声场分布的有限元仿真\*

崔佳嘉 马宏忠 李楠 程龙

(河海大学能源与电气学院 南京 211100)

**摘要:**为了研究变压器铁心振动噪声的分布情况,本文基于 COMSOL 的多物理场耦合计算分析一台 200 kVA 油浸式变压器铁心振动的声场分布。首先利用 COMSOL 有限元计算软件,构建了 200 kVA 油浸式变压器铁心振动的电-磁-力多物理场模型,计算出变压器铁心磁场分布情况及铁心所受应力分布变化规律、位移分布规律,并对铁心的典型位置的应力时域数据做频谱分析,得到铁心所受应力集中在 100、200、300 Hz。再将上述多物理场计算出的铁心表面加速度经过 FFT 变换后的频域数据作为声场的激励源,作声场的谐响应分析计算出变压器铁心振动的声场分布。最后,以一台 200 kVA 变压器空载实验数据验证仿真数据的正确性,经过比较发现有较好的吻合效果。仿真与实验得到的一致规律是:变压器铁心振动噪声频率集中在 500 Hz 以下,且发现规律:变压器油箱的侧方声压>上方声压>正面声压;变压器油箱的侧方及上方的声压频率含量是 100 Hz>200 Hz>300 Hz,而油箱的正面声压频率含量是 100 Hz>300 Hz>200 Hz。

**关键词:**铁心振动;多物理场耦合;空载;声场分布

**中图分类号:** TN06      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Simulation and analysis of vibration and noise of oil immersed transformer core based on COMSOL

Cui Jiajia Ma Hongzhong Li Nan Cheng Long

(School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In order to study the distribution of vibration and noise of transformer core, the sound field distribution of core vibration of a 200 kVA oil immersed transformer is analyzed based on the multi physical field coupling calculation of COMSOL. Firstly, the electro-magnetic force multi physical field model of core vibration of 200 kVA oil immersed transformer is constructed by using COMSOL finite element calculation software. The magnetic field distribution of transformer core, the variation law of stress distribution and displacement distribution of core are calculated. The stress time domain data of typical positions of core are analyzed by spectrum, and the stress concentration of core is 100, 200 and 300 Hz. Then, the frequency domain data of the iron core surface acceleration calculated by the above multiple physical fields after FFT transformation is used as the excitation source of the sound field, the harmonic response of the sound field is analyzed, and the sound field distribution of the transformer iron core vibration is calculated. Finally, the correctness of the simulation data is verified by the no-load experimental data of a 200 kVA transformer. After comparison, it is found that it has a good agreement effect. The consistent law between simulation and experiment is that the vibration and noise frequency of transformer core is concentrated below 500 Hz, and it is found that the side sound pressure of transformer oil tank > upper sound pressure > front sound pressure; The sound pressure frequency content on the side and above the transformer oil tank is 100 Hz > 200 Hz > 300 Hz, while the sound pressure frequency content on the front of the oil tank is 100 Hz > 300 Hz > 200 Hz.

**Keywords:** core vibration; coupling of multiple physical fields; no load operation; sound field distribution

## 0 引言

随着全球经济的快速发展,人类对电力能源的需求不断增加,因此近些年来我国致力于输电技术的发展。而电力变压器作为输电线上最重要的电力设备之一<sup>[1-7]</sup>,随着电力系统容量不断增大和电压等级的不断升高,变压器产生的噪声污染对环境以及人们的生活产生了严峻的影响。因此电力变压器的振动噪声问题亟需得到研究与解决。声音由振动产生,变压器本体噪声的振动来源是铁芯和绕组:铁芯振动的原因是当其处在交变磁场时,硅钢片由于磁致伸缩效应发生结构大小上的变化,宏观上表现出随时间周期性变化的特性;绕组振动是由于载流导体通有电流后在磁场中受力产生振动。大量研究表明,与铁芯受磁致伸缩效应振动相比,绕组振动在数量级上是极小的,因此本文主要研究铁芯由于磁致伸缩振动产生的噪声分布。

目前,利用变压器振动与噪声数据的监测实现变压器故障诊断已经成为重要手段之一,因此对变压器运行时的振动与噪声分布的研究十分有意义<sup>[8-11]</sup>。李冰等<sup>[12]</sup>对一台 500 kV 的单相变压器试验,得到其振动与噪声信号分布的主要频段在 1 000 Hz 以下,并验证了振动信号与噪声信号的关联性,为实现振动与噪声同步在线监测提供了依据,但是其研究的是单相变压器,所得的结论并不一定适用于三相变压器。祝雨花等<sup>[13]</sup>通过建立干式变压器三维磁-机械强耦合数值模型,仿真出由于磁致伸缩引起的硅钢片振动噪声的分布,通过数值计算计算出变压器运行时周围的声场情况,但是其并未对仿真及采集到的声压信号中所含的频谱信息进行分析。侯东等<sup>[14]</sup>测试了 35 kV 油浸式变压器运行时周围声场的变化情况,得到变压器周围声场集中在 500 Hz 以下以低频为主的频谱特征,同样该测试也只针对该型号的变压器。已有的研究是局限在变压器运行过程中产生的噪声信号中的频率集中的范围,对于频率分量的大小以及变压器 3 个方向的声压大小没有过多的研究,本文针对主要频率分量的声压比较与 3 个方向上的声压比较作出仿真比较和实验验证。

本文对一台 S13-M-200/10 变压器建模,应用有限元仿真软件 COMSOL 建立电磁-结构-声场的全耦合,计算出变压器空载情况下的磁场分布,振动位移分布和声场分布。

## 1 变压器铁芯噪声产生原理

油浸式变压器的噪声主要是由油箱表面的振动引起的,而油箱表面的振动是由于铁芯和绕组自身的振动通过变压器油或者结构件传递到油箱。大量文献表明,变

压器在工作状态时的磁密在 1.5~1.8 之间时,这时由于负载电流引起的绕组振动极小,因此铁心振动是引起变压器噪声的主要原因。

铁心振动的原因一是硅钢片在交变磁场中磁致伸缩引起振动,二是硅钢片的接缝处和叠片间由于漏磁引起振动。但随着变压器制造工艺技术不断提高,后者引发的振动已经被大大削减。基于简化的励磁模型,线性、各向同性的铁磁材料所受的磁场力的体积力密度为:

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \frac{1}{2} H^2 \nabla u + \frac{1}{2} \nabla \left( H^2 \tau \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{f}$ 为体积力密度矢量, $\mathbf{J}$ 为电流密度, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度, $H$ 为磁场强度, $u$ 为介质的磁导率, $\tau$ 为介质的体积密度。式中第 1 项表示硅钢片涡流效应产生的洛伦兹力,上述可知该电磁力可被忽略;第 2 项在保证变压器运行时硅钢片在非饱和的情况下,磁导率仅与体积密度有关,该项可以被忽略,因此磁场力可以表示为:

$$\mathbf{f}_c = \frac{1}{2} \nabla \left( H^2 \tau \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (2)$$

铁芯发生磁致伸缩所受的电磁力为<sup>[15]</sup>:

$$\mathbf{F}_c = \int \frac{1}{2} \nabla \left( H^2 \tau \frac{\partial u}{\partial t} \right) d\mathbf{s} = F_{\max} \sin 2 \quad (3)$$

综上所述,铁心磁致伸缩变化的频率是电源频率的两倍。当外加电源为 50 Hz 正弦波时,产生 50 Hz 的交变磁场,当磁通密度由波峰到波谷这 1/2 周期内时,宏观上硅钢片完成了一次由最大伸缩量恢复到原状再到最大伸缩量的周期过程。在另外 1/2 周期内,磁通密度由波谷到波峰的过程中,磁化方向相反,但在宏观上表现出的磁致伸缩特征是相同的。因此,在磁通密度变化的一个周期内,铁芯磁致伸缩表现出两个周期的振动,变压器由 50 Hz 电源励磁时,硅钢片磁致伸缩的基频为工频的两倍即 100 Hz<sup>[16]</sup>。

## 2 多物理场计算

### 2.1 电磁场

变压器空载运行时负荷电流为 0,绕组振动相比铁芯振动小的多,基本可以忽略,此时油箱表面的振动可以反映铁芯振动情况。

在变压器模型的初级绕组上加上额定励磁电压 400 V,频率为  $f=50$  Hz,设置次级绕组的电流为 0。对变压器模型的三相初级绕组设置三相交流电,励磁电压表达式分别是:

$$\begin{aligned} U_A &= U_N \sin \left( 2\pi f \cdot t - \frac{2}{3}\pi \right) \\ U_B &= U_N \sin (2\pi f \cdot t) \\ U_C &= U_N \sin \left( 2\pi f \cdot t + \frac{2}{3}\pi \right) \end{aligned} \quad (4)$$

磁场计算中作如下假设:1) 工作环境没有其他电场的影响;2) 求解得到的与频率相关的变量都是以正弦波规律变化;3) 由于铁心振动引起的振动噪声集中在 1 kHz 以下,因此不考虑含有更高次谐波分量的影响;4) 不考虑位移电流产生的磁场对模型的影响。此时,电磁场满足麦克斯韦方程<sup>[17]</sup>:

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times B &= 0\end{aligned}\quad (5)$$

式中: $H$  表示磁场强度, $J$  表示传导电流密度, $E$  表示电场强度, $B$  表示磁通密度。

变压器铁心的硅钢片材料的磁化特性曲线是非线性的,剪切加工堆叠成铁心后的 B-H 曲线和硅钢卷出厂时的特性曲线差别很大,因此通过实验测试获得的磁化特性参数导入到模型中,采用线性插值拟合曲线的方法设置铁心的磁化特性曲线,如图 1 所示。

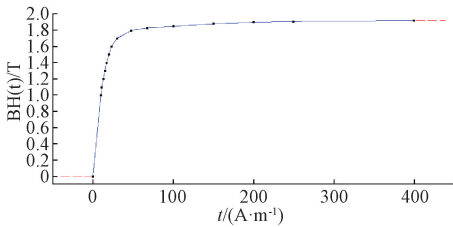


图 1 实测 B-H 曲线

Fig. 1 Measured B-H curve

## 2.2 结构场耦合

通过对电磁场的瞬态研究,得到铁芯受电磁力随时间变化的瞬态值,利用弹性力学原理可以将铁心材料应变转化为激励力。在确定铁心各向同性的弹性模量后,利用应变能原理将硅钢片磁致伸缩效应等效为磁致伸缩力,将其作为铁心振动的输入激励信号,铁心的振动方程为<sup>[18]</sup>:

$$\mathbf{M} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \mathbf{C} \frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{D}u = P(t) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{M}$  为质量矩阵, $\mathbf{C}$  为阻尼矩阵, $\mathbf{D}$  为刚度矩阵, $u$  为节点位移, $P(t)$  为等效磁致力。

## 2.3 声场

声场的计算通过有限元法求解 Helmholtz 方程,通过球形完美匹配层 (PML) 来模拟开放的域,用于计算外场声压。将 Helmholtz 波动方程傅里叶变换后得到频域内的方程为<sup>[19]</sup>:

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} \nabla P \right) - \frac{k_{eq} P}{\rho_0} = 0 \quad (7)$$

$$k_{eq}^2 = \left( \frac{\omega}{C_c} \right)^2 \quad (8)$$

对于声场模量,变量  $P$  由式 (6) 得到,其中  $\rho_0$  为流体密度, $c$  为声速, $\omega$  为角频率, $C_c$  为体积模量。在频域内,声学界面被用来研究声学,该界面进行了结构动力学的双向耦合研究,将前几节中进行的时域结果进行时域到频域 (FFT) 分析,将结果应用于声学研究。

## 3 变压器铁芯振动噪声有限元分析

首先建立铁心的三维几何模型,铁心结构形式为三相三柱式,每一相的初级绕组线圈和次级绕组线圈均安装在同一根心柱上,铁心是由硅钢片堆叠而成<sup>[20]</sup>。网格剖分的方法是:绕组的底面采用自由三角形网格,线圈部分采用 5 层扫掠网格;铁芯采用自由四面体网格,并设置为较细化;空气部分采用自由四面体网格;油箱采用 5 层扫掠网格。为了精确计算出铁芯表面的位移及所受到的应力,因此采用较细化的自由四面体网格,而对于绕组、空气及油箱则尽量减少网格的数量,提高计算的效率。建好的变压器有限元分析模型如图 2 所示。变压器的主要参数如表 1 所示。

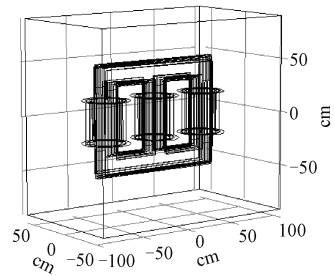


图 2 变压器模型

Fig. 2 Transformer model

表 1 变压器模型参数

Table 1 Transformer model parameters

参数	额定电压	相电流	线圈匝数	联结方式
原边	10 kV	13.55 A	693	D 型连接
副边	400 V	577.35 A	32	yn 连接

### 3.1 磁场

在计算电-磁-结构场时,对其进行瞬态求解,采用全耦合的求解器,设置最大的迭代次数为 4。求解器步长设置为 0.000 5 s,总求解时间为 0.2 s,计算得到铁心的磁感应强度分布。在某一时刻  $t=0.006$  s 时铁心表面磁感应强度如图 3 所示。

### 3.2 结构场

根据变压器的电磁场分布结果,可以计算出铁芯的受力和形变情况,取  $t=0$  s,  $t=0.005$  s,  $t=0.01$  s,  $t=0.02$  s

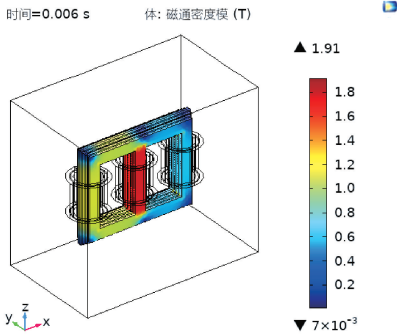
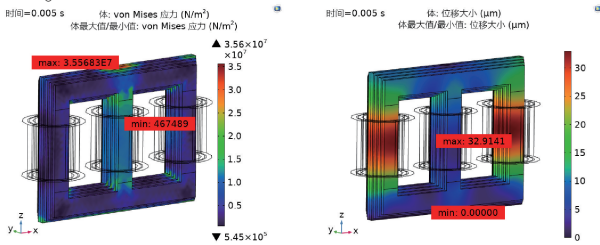
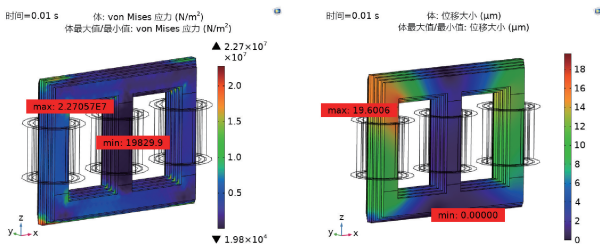


图 3  $t=0.006$  s 时铁芯磁感应强度分布  
Fig. 3 Distribution of magnetic induction intensity of iron core at  $t=0.006$  s

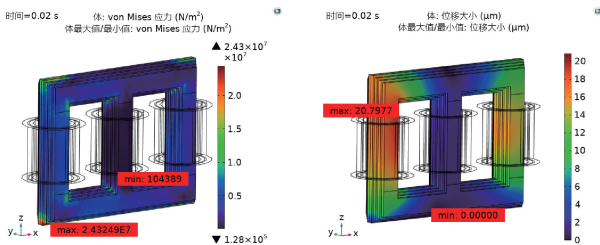
这 4 个时刻的受力与形变结果, 比较不同时刻的不同部位的应力与位移大小如图 4 所示。由仿真图可知, 在初始时刻( $t=0$  s), 铁芯还未受到电磁场的作用, 因此所受的应力与形变均为 0。而由于铁芯的磁致伸缩率与磁感应强度存在非线性关系, 导致在铁芯不同部位的受力和形变量存在差异。不同时刻的应力大小分布如图 5 所示。



(a)  $t=0.005$  s



(b)  $t=0.01$  s



(c)  $t=0.02$  s

图 4  $t=0.005$  s、 $t=0.01$  s 及  $t=0.02$  s 时铁芯的应力与位移分布

Fig. 4 Stress and displacement distribution of iron core at  $t=0.005$  s,  $t=0.01$  s and  $t=0.02$  s

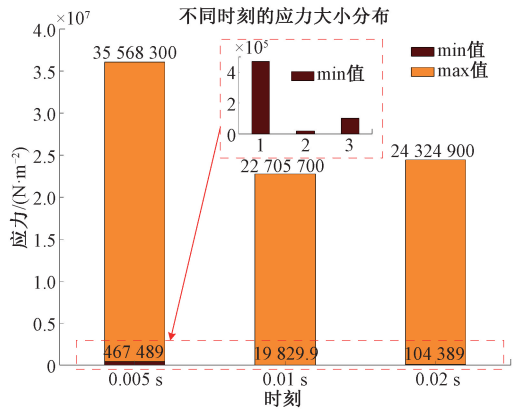


图 5 不同时刻铁芯表面应力的最大最小值  
Fig. 5 Maximum and minimum values of core surface stress at different times

为了分析铁芯柱和铁芯轭部的不同受力和位移情况, 取铁芯不同位置(如图 6)的应力数据, 不同位置随时间变化的曲线如图 7 所示。

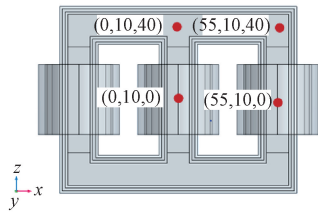


图 6 铁芯不同位置坐标

Fig. 6 Coordinate diagram of different positions of iron core

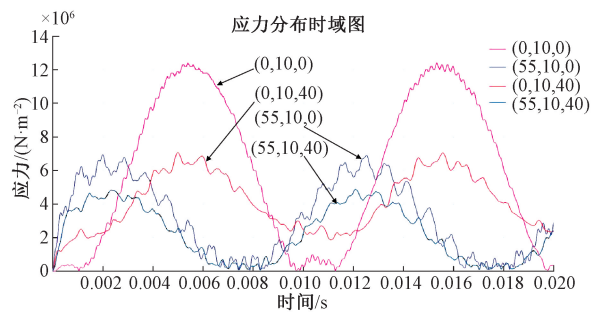


图 7 不同位置所受应力的时域曲线

Fig. 7 Time domain curve of stress at different positions

从时域图 7 中看出, 点(0, 10, 0)是中柱中心的位置, 它整体的应力幅值都比其他位置的幅值大, 因此该点是振动最大的位置。绘制频谱图如图 8 所示。由图 8 可以看出, 各个点所受的应力中, 100、200 及 300 Hz 含量要远高于其他频率分量, 而其中 100 Hz 含量又远高于 200 Hz 及 300 Hz。中心柱中间的位置(0, 10, 0)呈现出的规律是频率含量 100 Hz > 300 Hz > 200 Hz, 而其他位置均是呈现



出 100 Hz>200 Hz>300 Hz 的规律。(图 8:100 Hz 分量自上而下表示的坐标分别是(0,10,0),(55,10,0),(0,10,40),(55,10,40);200 Hz 分量自上而下表示的坐标分别是(0,10,40),(55,10,0),(55,10,40),(0,10,0);300 Hz 分量自上而下表示的坐标分别是(0,10,0),(55,10,0),(55,10,40),(0,10,40))

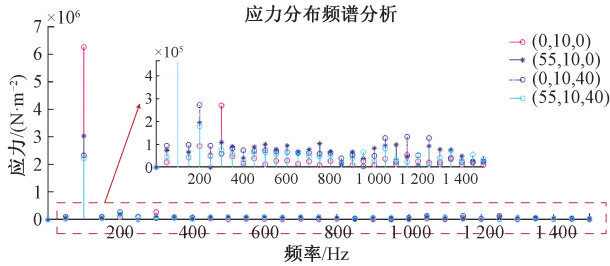


图 8 不同位置的应力频谱

Fig. 8 Stress spectrum at different positions

### 3.3 声场

由于声场需要在频域内分析,输入的边界条件是结构场中变压器铁芯在频域内的表面振动加速度,利用 COMSOL 软件自带的“时域到频域(FFT)”功能将结构场计算出的时域数据转换成频域数据,将其作为声场的激励源。由结构场仿真可知,振动数据主要集中在 100、200 及 300 Hz,因此针对这 3 个频率做声场的谐响应分析,观察变压器模型的上、侧面及正面的声场分布图,仿真图如图 9 所示。

由图 10 的油箱正方、上方及侧方声压级分布图看出,3 个面都呈现出相同的规律:声压频率以 100、200 及 300 Hz 为主,且 100 Hz 分量最可以大。油箱各表面整体呈现的规律是侧方声压值>上方声压值>正方声压值。

## 4 试验

本文对一台 S13-M-200/10 变压器做空载试验与仿真结果比较。变压器的主要参数如表 2 所示。

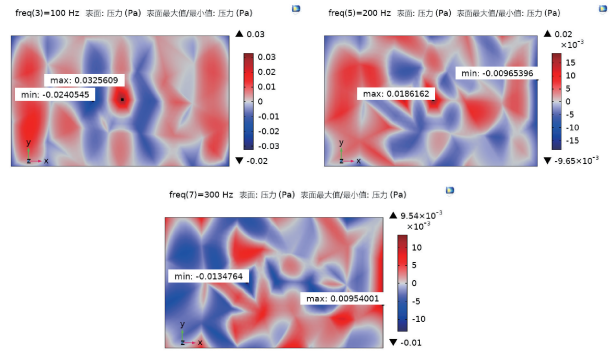
表 2 试验变压器参数

Table 2 Test transformer parameters

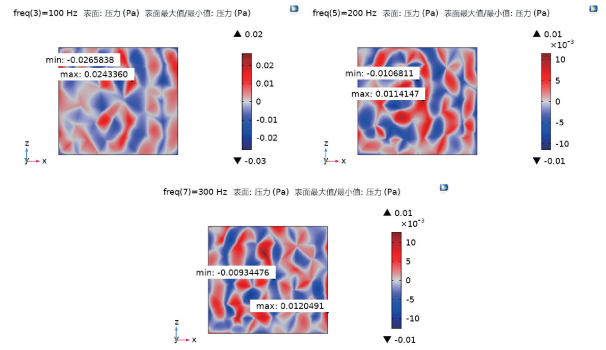
参数	数值
额定容量/kVA	200
额定电压/kV	10/0.4
额定电流/A	11.5/288.7
联结组标号	Dyn11
短路阻抗/%	3.98

### 4.1 实验平台

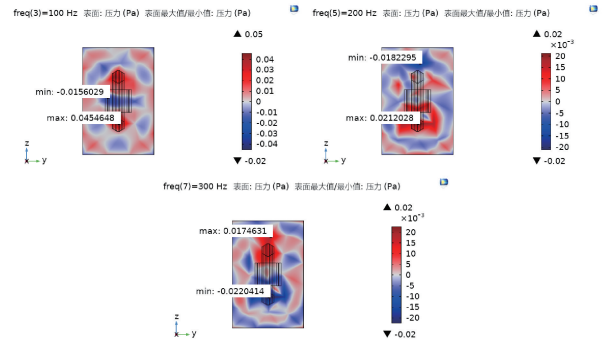
实验平台由 S13-M-200/10 变压器 1 台、声传感器若



(a) 油箱正面各频率分量声压级分布图  
(a) Distribution diagram of sound pressure level of each frequency component on the front of oil tank



(b) 油箱上表面各频率分量声压级分布图  
(b) Distribution diagram of sound pressure level of each frequency component on the upper surface of oil tank



(c) 油箱侧面各频率分量声压级分布图  
(c) Distribution diagram of sound pressure level of each frequency component on the surface of oil tank side

图 9 油箱正面、上表面及侧表面声压级分布图

Fig. 9 Distribution of sound pressure level on front, upper and side surfaces of oil tank

干、数据线若干,采集仪 1 台与计算机 1 台组成。根据国标 GB/T 1094.10—2003 对该变压器噪声测量的标准和要求,采用电容式麦克风作为声传感器对变压器变压器正面、侧面与上方的位置的声音信号进行采集,实验均在深夜进行,以免有其他的噪音混入,环境因素几乎对噪声测试结果没有影响,试验平台如图 11 所示。

### 4.2 试验数据分析

进行实验时,数据的采样频率为 64 kHz,频率响应为

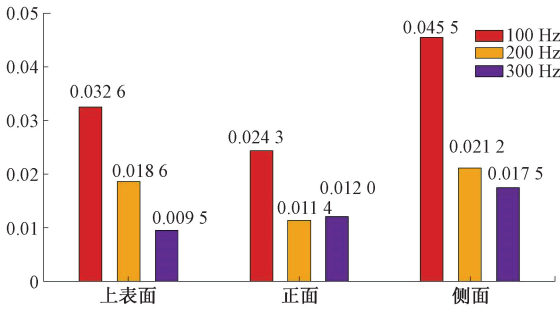


图 10 油箱上表面、正面、及侧表面声压最大值

Fig. 10 Maximum sound pressure on front, upper and side surfaces of oil tank

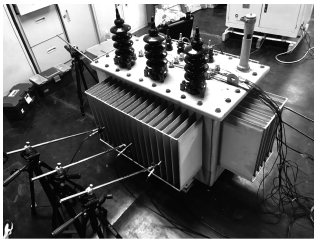


图 11 试验平台

Fig. 11 Experimental platform

20~20 kHz。截取每段实验数据 2 s,共 128k 个数据点。油箱各方位采集的时域数据如图 12 所示。

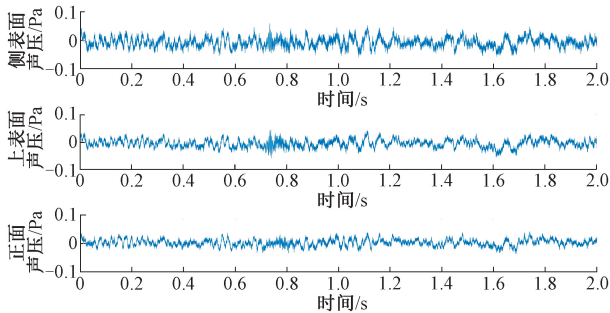


图 12 侧表面、上表面、正面的原始声压时域图

Fig. 12 Original sound pressure time domain diagram of front, side and top

将图 12 采集到的时域声压数据通过做傅里叶变换得到频谱图,考虑到共有 128k 个数据点,因此作  $\text{fft}(y, N)$  ( $N=2^{17}$ ),得到的频谱图如图 13 所示。

将实测数据处理后发现,横向比较时,3 个位置的声压数据都呈现出的规律是:声压集中在 500 Hz 及以下,500 Hz 以上的含量极少,其中 100、200、300 Hz 的含量非常突出,而 100 Hz 的含量最高,侧表面与上表面的声压均是 100 Hz>200 Hz>300 Hz,而正面的声压是 100Hz>300 Hz>200Hz;纵向比较时,呈现的规律是:侧表面声压

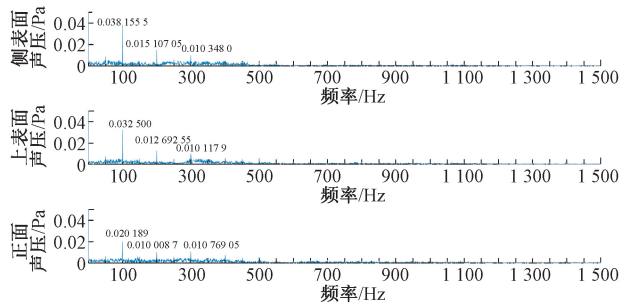


图 13 试验数据的频谱图

Fig. 13 Spectrum of test data

级>上表面声压级>正面声压级。

### 4.3 试验结果与仿真结果比较

通过比较实测数据频谱分析图(图 10)与仿真得到的声压频率图(图 13),各分量的测得的数据与仿真结果的差值不超过 0.007 3 Pa(仿真数据与实测数据比较如图 14),实测的数据比仿真数据略小,原因考虑到 3 点:1)铁芯振动发出噪声后通过变压器油传播到油箱外时,存在声音能量的衰减;2)实验的变压器是放在绝缘垫上进行实验,存在一定的减振效果;3)在仿真时,突出变压器铁芯的振动噪声效果,而忽略了结构件对铁芯振动的作用。

但该实测数据呈现的规律与仿真结果相一致,因此该模型具有可靠性。(图 14 中虚线框出的两列左侧表示仿真 100 Hz 和实测 100 Hz,实线框出的两列左侧表示仿真 300 Hz 和实测 300 Hz,剩下未被框出的两列表示仿真 200 Hz 和实测 200 Hz)

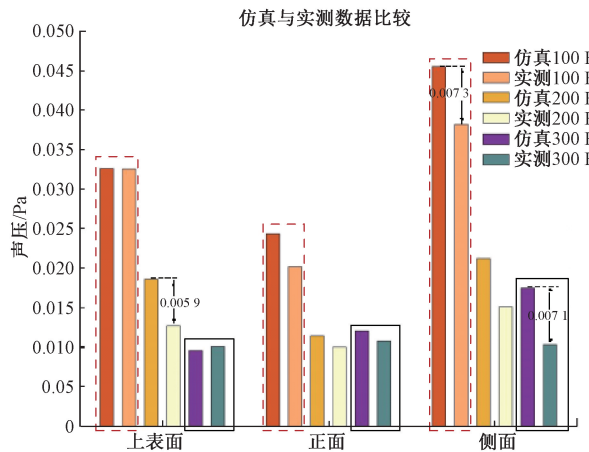


图 14 试验与实测数据比较

Fig. 14 Comparison of test and measured data

## 5 结论

通过建立基于 COMSOL 的变压器铁心振动噪声有

限元仿真模型,对变压器空载时的声场进行仿真,有效的仿真出铁芯的振动与声场的频谱规律,并以一台 S13-M-200/10 变压器作空载实验验证了模型的可靠性,得到的结论如下:

1) 变压器铁芯振动噪声的声压集中在 500 Hz 及以下,500 Hz 以上的含量极少,其中 100、200、300 的含量非常突出,而 100 Hz 的含量最高。侧表面与上表面的声压均是 100 Hz>200 Hz>300 Hz,而正面的声压是 100 Hz>300 Hz>200 Hz。

2) 变压器铁芯振动噪声辐射后,呈现的规律是:侧表面声压级>上表面声压级>正面声压级。

## 参考文献

- [ 1 ] 张朝龙,何怡刚,杜博伦,等. 基于深度学习的电力变压器智能故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(1):81-89.  
ZHANG CH L, HE Y G, DU BO L, et al. Intelligent fault diagnosis method of power transformer based on deep learning [J] Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020,34 (1): 81-89.
- [ 2 ] 余长厅,黎大健,陈梁远,等. 基于声纹及振动的变压器故障诊断技术研究[J]. 高压电器,2019,55(11): 248-254.  
YU CH T, LI D J, CHEN L Y, et al. Research on transformer fault diagnosis technology based on voiceprint and vibration [J] High Voltage Apparatus, 2019, 55 (11): 248-254.
- [ 3 ] 马裕超,莫娟,徐铗,等. 220kV 油浸式变压器振动与噪声试验研究[J]. 变压器,2017,54(7):49-55.  
MA Y CH, MO J, XU R, et al. Experimental study on vibration and noise of 220 kV oil immersed transformer [J]. Transformer, 2017,54 (7): 49-55.
- [ 4 ] 李德波,李冰阳,刘耀云,等. 电力变压器振动噪声的多物理场耦合分析[J]. 广东电力,2017,30(6): 115-119.  
LI D B, LI B Y, LIU Y Y, et al. Multi physical field coupling analysis of vibration and noise of power transformer [J] Guangdong Electric Power, 2017, 30 (6): 115-119.
- [ 5 ] 黄文婷,郑婧,黄海,等. 电力变压器振动信号分离方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(1): 111-117.  
HUANG W T, ZHENG J, HUANG H, et al. Research on vibration signal separation method of power transformer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30 (1): 111-117.
- [ 6 ] WU Y, ZHANG Z, XIAO R, et al. Operation state identification method for converter transformers based on vibration detection technology and deep belief network optimization algorithm [C]. Actuators. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021, 10(3): 56.
- [ 7 ] SWAMY K V S N, SAVADAMUTHU U. Sweep frequency response based statistical approach for locating faults in transformer windings using sliding window technique[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 194: 107061.
- [ 8 ] HAO M, CHUANG Y, MINGHUI D, et al. Research on transformer condition evaluation technology based on vibration signal analysis [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 645(1): 012036.
- [ 9 ] 王雨虹,王志中,付华,等. 多策略改进麻雀算法与 BiLSTM 的变压器故障诊断研究[J/OL]. 仪器仪表学报: 1-11 [2022-03-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2179.TH.20211230.1641.040.html>.  
WANG Y H, WANG ZH ZH, FU H, et al. Research on transformer fault diagnosis based on multi strategy improved sparrow algorithm and bilstm [J/OL]. Chinese Journal of Scientific Instrument: 1-11 [2022-03-09] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2179.TH.20211230.1641.040.html>.
- [ 10 ] 仝兆景,乔征瑞,李金香,等. 基于 MPC 算法优化的贝叶斯网络变压器故障诊断[J]. 电子测量技术,2021, 44(17):41-45.  
TONG ZH J, QIAO ZH R, LI J X, et al. Bayesian network transformer fault diagnosis based on MPC algorithm optimization [J] Electronic Measurement Technology, 2021,44(17):41-45.
- [ 11 ] 杨毅,徐晓冉,刘雅琳,等. 基于离散二进制粒子群优化随机森林的平面变压器寄生参数预测模型[J]. 国外电子测量技术,2021,40(4):37-41.  
YANG Y, XU X R, LIU Y L, et al. Prediction model of parasitic parameters of planar transformer based on discrete binary particle swarm optimization random forest [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(4):37-41.
- [ 12 ] 李冰,王泽忠,刘海波,等. 直流偏磁下 500kV 单相变压器振动噪声的试验研究[J]. 电工技术学报,2021, 36(13):2801-2811.  
LI B, WANG Z ZH, LIU H B, et al. Experimental study on vibration and noise of 500kV single-phase transformer under DC bias [J]. Journal of Electrotechnics, 2021, 36 (13): 2801-2811.
- [ 13 ] 祝丽花,杨庆新,闫荣格,等. 考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究[J]. 电工技术学报,2013, 28(4):1-6,19.

- ZHU L H, YANG Q X, YAN R G, et al. Study on vibration and noise of power transformer considering magnetostriction effect [J]. Journal of Electrotechnics, 2013, 28 (4): 1-6, 19.
- [14] 侯东,段炼,曹春诚,等. 35 kV 油浸式配电变压器噪声与振动测试[J]. 应用声学, 2020, 39(6): 964-968.
- HOU D, DUAN L, CAO CH CH, et al. Noise and vibration test of 35 kV oil immersed distribution transformer [J]. Applied Acoustics, 2020, 39 (6): 964-968.
- [15] 马宏忠,赵宏飞,陈楷,等. 基于振动的变压器铁芯松动判定方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (14): 101-106.
- MA H ZH, ZHAO H F, CHEN K, et al. Determination method of transformer core looseness based on vibration [J]. Power System Automation, 2013, 37 (14): 101-106.
- [16] 魏亚军,臧春艳,顿玲. 三相电力变压器振动噪声的多物理场研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13 (19): 5632-5635, 5660.
- WEI Y J, ZANG CH Y, DUN L. Study on multi physical fields of vibration and noise of three-phase power transformer [J]. Science, Technology and Engineering, 2013, 13 (19): 5632-5635, 5660.
- [17] HANE Y, NAKAMURA K, KURITA N. A consideration of magnetostriction force calculation for transformer core by using reluctance network analysis; Power magnetics [J]. Journal of the Magnetics Society of Japan, 2021; 2105R009.
- [18] CAI Y H. Analysis on transformer vibration signal recognition based on convolutional neural network [J]. Journal of Vibroengineering, 2021, 23(2): 484-495.
- [19] EBADI A, HOSSEINI S M, ABDOOS A A. A new time-frequency analysis based supervision method for the transformer restricted ground fault relay [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 129: 106858.
- [20] 陈传敏,冯洪达,郭兆枫,等. 220 kV 电力变压器辐射噪声特性仿真分析[J]. 电力学报, 2020, 35 (6): 515-521.
- CHEN CH M, FENG H D, GUO ZH F, et al. Simulation analysis of radiated noise characteristics of 220 kV power transformer [J] Journal of Electric Power, 2020, 35 (6): 515-521.

### 作者简介



崔佳嘉, 2020 年于苏州科技大学获得学士学位, 现为河海大学在读研究生, 主要研究方向为电力设备状态监测及故障诊断。

E-mail: 549885860@qq.com

**Cui Jiajia** received a B. Sc. degree from Suzhou University of Science and Technology in 2020. She is now a M. Sc. candidate in Hohai University, her main research interests include power equipment condition monitoring and fault diagnosis.