

# 非晶变压器的磁致伸缩特性与振动噪声分析

周晓雨, 沙 瑞, 石永恒

天津工业大学, 天津  
Email: 18822081217@163.com

收稿日期: 2021年5月12日; 录用日期: 2021年6月16日; 发布日期: 2021年6月24日

## 摘 要

为了研究非晶合金变压器中的磁致伸缩特性, 本文首先对非晶合金带材进行了磁特性与磁致伸缩特性的测量, 建立了一个非晶合金磁致伸缩预测模型。然后在非晶合金的磁特性与磁致伸缩特性的测量数据的基础上, 建立一个非晶合金变压器的有限元模型, 并进行了多物理场分析。通过搭建不同频率下的非晶合金变压器的磁致伸缩测量实验, 对不同频率下的磁特性与磁致伸缩特性进行分析, 并根据测量结果建立非晶合金数值模型进行振动噪声分析。将测量结果与模型计算结果进行对比, 论证了磁致伸缩预测模型的准确性。

## 关键词

变压器, 非晶合金, 磁致伸缩模型, 振动噪声

# Analysis of Magnetostrictive Characteristics and Vibration and Noise of Amorphous Transformer

Xiaoyu Zhou, Rui Sha, Yongheng Shi

Tiangong University, Tianjin  
Email: 18822081217@163.com

Received: May 12<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jun. 16<sup>th</sup>, 2021; published: Jun. 24<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to study the magnetostrictive characteristics of amorphous alloy transformer, in this paper, the magnetic characteristics and magnetostrictive characteristics of amorphous alloy strip

were measured firstly, and a prediction model for the magnetostrictive properties of amorphous alloy was established. Based on the measured data of magnetic and magnetostrictive characteristics of amorphous alloy, a finite element model of amorphous alloy transformer is established, and multi-physical field analysis is carried out. By building the magnetostrictive measurement experiments of amorphous alloy transformers at different frequencies, the magnetic characteristics and magnetostrictive characteristics at different frequencies were analyzed, and according to the measurement results, the numerical model of amorphous alloy was established for vibration and noise analysis. The accuracy of the magnetostriction prediction model is proved by comparing the measured results with the model calculation results.

## Keywords

Transformer, Amorphous Alloy, Magnetostrictive Model, Vibration and Noise

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着社会工业化和城市化程度的进一步提高,城市人口密度不断增加,配电系统与居民区的位置越来越近,变压器产生的噪声与人之间的距离越来越近,目前的强度虽然不会危及生命,但是长期存在却会对人体健康产生影响,同时,也会对变压器本体产生不良影响[1]。与此同时,随着电力电子技术和电工装备的快速发展,电力装备朝着大功率、小型化的方向不断发展。由于高频变压器频率较高,磁芯和绕组的体积和重量会相应减小,这一变化直接导致了一个效果,那就是传递能量的功率密度得到了进一步提高,这就使得相比于传统变压器,高频变压器可以在节省空间和节约材料成本的同时保持较高的工作效率,优势十分突出[2]。

在磁致伸缩模型的建立方面,文献[3]等从磁畴理论、现象学理论、热力学关系及弹性力学4个角度对磁致伸缩的建模机理与存在的问题进行了具体阐述与分析。文献[4][5]对不同型号的硅钢片在不同工况下进行了较为准确的磁特性与磁致伸缩测量,考虑磁畴转矩建立了适用于硅钢片的磁致伸缩模型。

非晶合金电力设备的振动噪声主要来源是由于非晶合金的磁致伸缩引起的电磁振动[6]。目前,国内外学者基于磁-机械耦合模型对非晶铁心设备振动噪声已有一定的研究,主要针对应力、温度等外界条件对非晶合金变压器振动噪声的影响进行了分析研究[7][8][9]。当前的研究趋势是:在已有研究的基础上,把噪声影响因素考虑在内进行研究,尽可能地模拟现实中电工装备的实际运行情况,对振动噪声进行分析。

为了研究非晶合金变压器中由磁致伸缩效应引起的振动噪声特性,本文首先建立了一个非晶合金的磁致伸缩模型,紧接着结合磁致伸缩计算结果建立一个有限元仿真模型,来模拟工作状态下的变压器的振动噪声情况。通过不同的输入和磁致伸缩数据,计算得到不同频率下的磁通密度、应力和噪声分布,并设计实验进行测量验证。这为非晶合金的磁致伸缩特性模拟和振动噪声分析提供了参考。

## 2. 非晶合金的磁致伸缩测量与模拟

本小节主要就非晶合金变压器的磁特性与磁致伸缩特性进行测量与建模分析。通过测量装置对非晶合金带材进行测量,基于实验测量的非晶合金磁特性与磁致伸缩特性数据,结合改进 J-A 模型,建立非晶合金磁致伸缩模型,并通过粒子群优化算法对模型参数进行优化计算。

## 2.1. 磁特性与磁致伸缩特性测量

非晶合金的磁特性与磁致伸缩特性的实验测量图如图 1 所示,磁特性与磁致伸缩特性测量设备主要包括励磁装置、初级绕组、采集绕组、轭铁、激光干涉仪、位于底部的光学隔震平台以及计算机等。

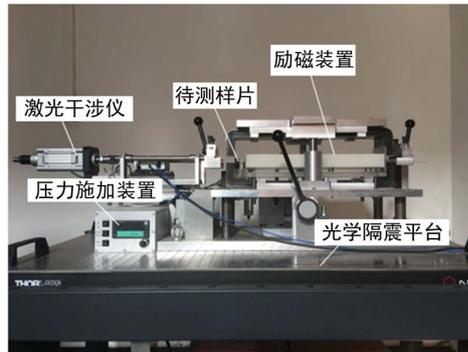


Figure 1. Magnetostrictive characteristic measuring device MST500  
图 1. 磁致伸缩特性测量装置 MST500

测量得到的不同磁通密度下的磁特性与磁致伸缩特性数据如图 2 所示。

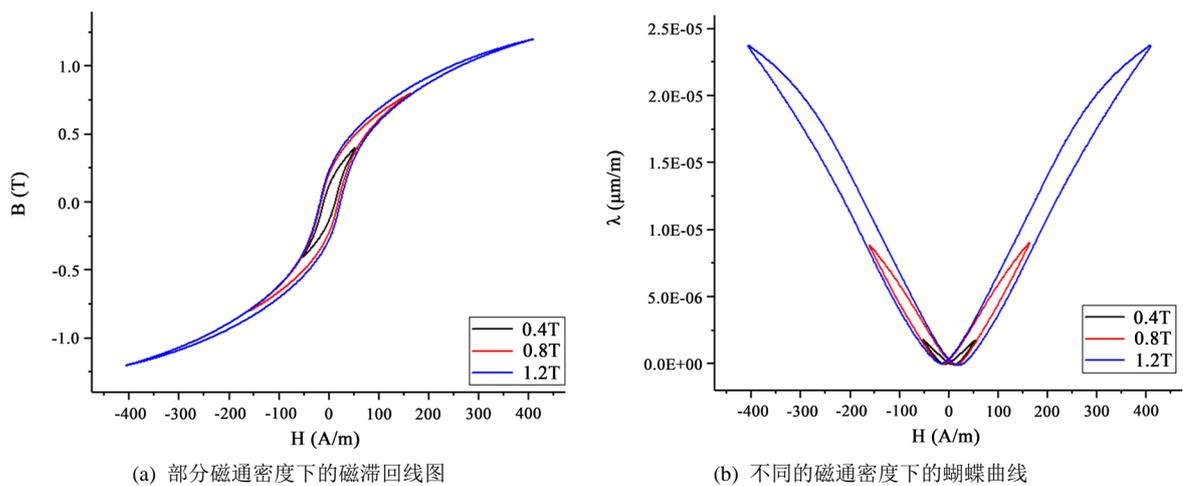


Figure 2. Measurement results of amorphous strip  
图 2. 非晶带材的测量结果

## 2.2. 模型的建立

关于 J-A 磁滞模型的研究已经有了长久发展,现阶段的研究主要集中在以磁畴平移作为主要磁化机制的磁化过程,并且有了很好的描述[10] [11] [12]。在传统 J-A 模型的能量平衡方程基础上,综合考虑涡流损耗以及异常损耗,就可以得到较完善的磁性材料中磁化能量平衡方程。同时,基于磁畴旋转理论,在趋于磁饱和的过程中,参数  $k$  是随着磁化状态的变化不断变化的。用不可逆磁化强度  $M_{irr}$  作为自变量的修正函数对损耗系数  $k$  进行修正。因此,在动态 J-A 模型中引入参数  $\nu$ ,将上边的 J-A 模型进行修正,推导出适用于不同频率下的非晶合金的磁致伸缩预测模型。修正后得到的磁化过程中的能量平衡方程为:

$$\mu_0 \int M dH_e = \mu_0 \int M_{an} dH_e - \mu_0 \int k \left[ 1 - \nu \left( \frac{M_{irr}}{M_S} \right)^2 \right] \delta \frac{dM_{irr}}{dH_e} dH_e - \int k_c \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 dt - \int k_e \left| \frac{dB}{dt} \right|^{3/2} dt \quad (1)$$

其中,  $M$  表示磁化强度,  $M_{an}$  表示无磁滞磁化强度,  $M_{irr}$  为不可逆磁化强度,  $M_s$  为饱和磁化强度,  $H_e$  表示有效磁场,  $k_c$ 、 $k_e$  表示与涡流损耗以及异常损耗相关的参数。

从微观上看, 材料的磁致伸缩主要来自于晶体场、自旋轨道和磁偶极子相互作用的耦合。从宏观上看, 磁致伸缩是指材料内部的磁畴在外界激励条件下发生偏转, 磁畴沿磁场方向产生较小的变形。磁畴的方向也受到外界应力的影响。当磁性材料受到应力作用时, 磁畴反转的方向将发生偏转, 这与克服磁晶体各向异性的应力极性相反。

磁场和机械耦合引起的振动是非常复杂的。对于磁性材料而言, 磁性材料的外应力和晶格各向异性将影响其磁致伸缩系数。材料的磁畴反转主要是沿着易磁化的垂直轴方向进行。磁致伸缩应变  $\lambda$  和磁化强度  $M$  之间的关系可以被描述为:

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

只要 J-A 模型计算的磁化强度是准确的, 那么相应的磁致伸缩应变就是准确的。因此, 将(1)与(2)结合, 建立如下磁致伸缩模型如下:

$$\frac{d\lambda}{dB} = \frac{3\lambda_s M}{M_s^2} \frac{M - M_{an} - \frac{c\delta}{1-c} k \left[ 1 - v \left( \frac{M_{irr}}{M_s} \right)^2 \right] \frac{dM_{an}}{dH_e} + k_c \frac{dB}{dt} + k_e \delta \left| \frac{dB}{dt} \right|^{\frac{1}{2}}}{\mu_0 (\alpha - 1) \left( M_{an} - M + \frac{c\delta}{1-c} k \left[ 1 - v \left( \frac{M_{irr}}{M_s} \right)^2 \right] \frac{dM_{an}}{dH_e} \right) - \frac{\mu_0 \delta}{1-c} k \left[ 1 - v \left( \frac{M_{irr}}{M_s} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

### 2.3. 模型参数的计算

粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)以其独特的优势被广泛应用于参数优化中[13]。因此, 本节对改进的磁致伸缩模型的相关参数进行提取计算后, 用粒子群算法对参数进行优化。该算法的迭代格式简单, 具有群体智能、内在并行性, 可以快速收敛到最优解所在区域。

利用粒子群算法进行参数优化的过程, 实际上是求解参数的最佳组合使得目标函数的值最小的过程, 其参数的具体优化流程图如图 3 所示。

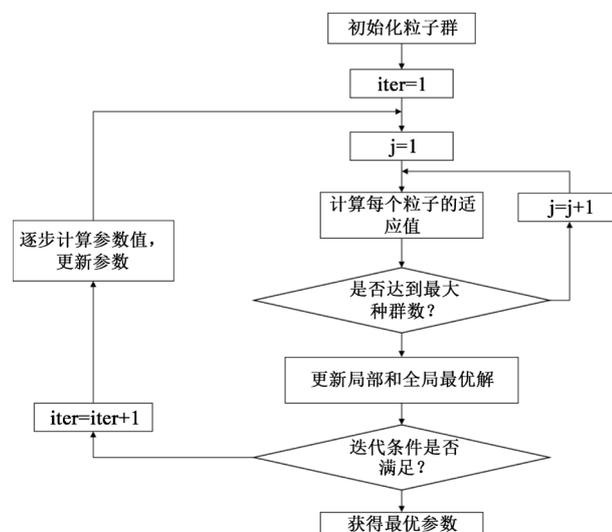
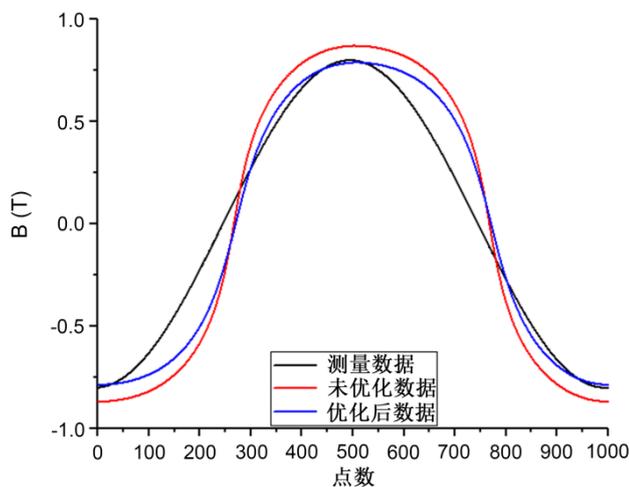


Figure 3. Particle swarm optimization algorithm diagram

图 3. 粒子群优化算法图

经过优化算法计算得到不同磁通密度下的参数,以 1k101 非晶合金带材为例进行讨论。如图 4 所示,展示了磁通密度  $B$  的波形在模型优化前后以及实验结果的对比。

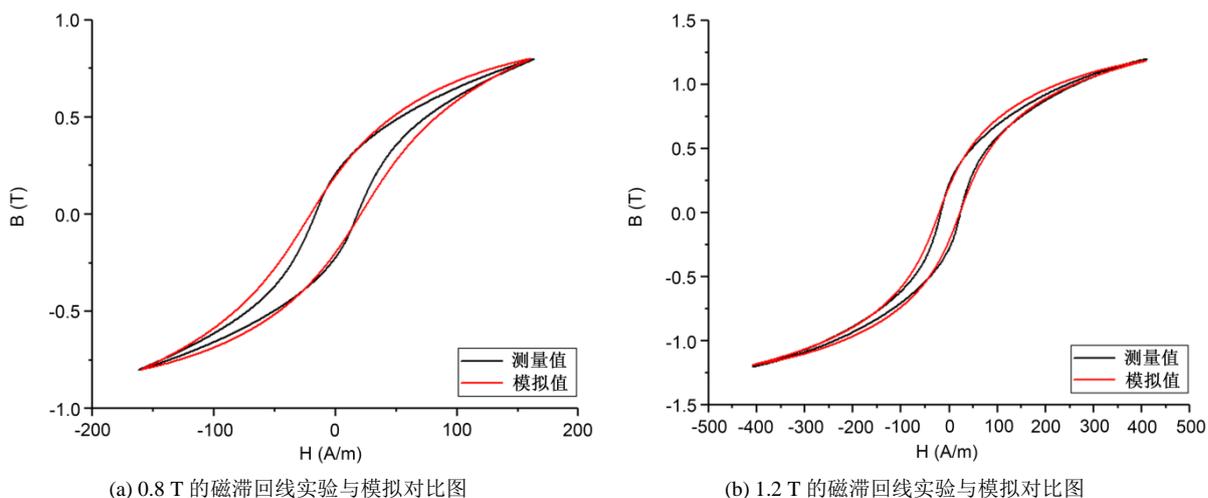


**Figure 4.** The magnetic flux density before and after optimization was compared with the experimental results  
**图 4.** 优化前后与实验结果的磁通密度对比

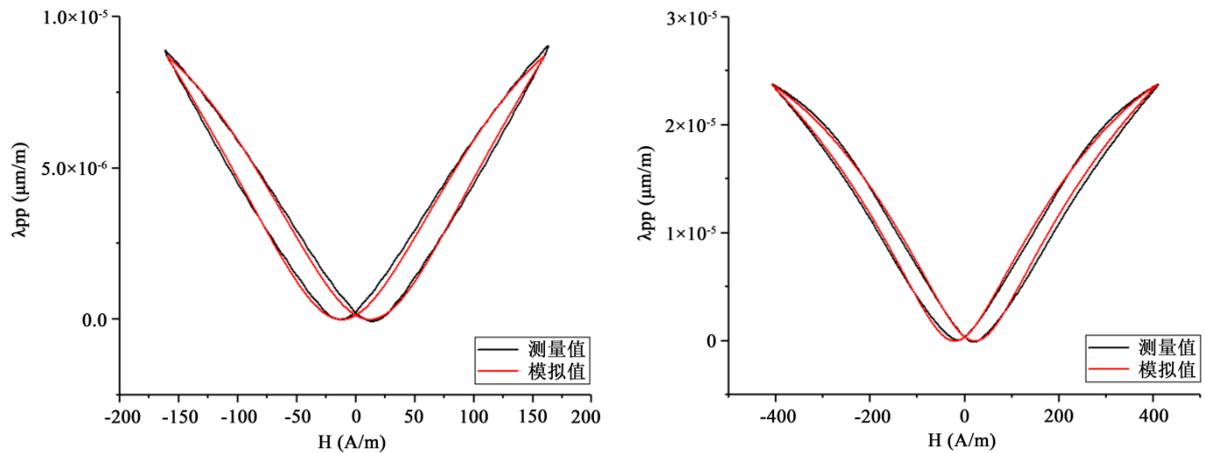
图 5 为在磁通密度分别为 0.8 T 和 1.2 T 的情况下,磁滞回线的测量与模拟对比图。图 6 为在磁通密度分别为 0.8 T 和 1.2 T 的情况下,磁致伸缩的测量与模拟对比图。可以看到,得到的计算结果与实验测量的结果极为接近,具有较好的一致性。结果表明本文建立的模型可以在不同磁通密度下对非晶合金材料的磁致伸缩模拟。

由此可知,工频条件下模型模拟得到的与实验测量得到的磁致伸缩数据误差较小,完全可以作为基础数据,应用于有限元仿真模型的计算之中,实现对变压器振动噪声的模拟。

由于实验条件的限制,在较低频率范围内进行多次不同频率的测量,分别对不同频率下的数据进行分析,并完成上述测量分析的过程。这个过程中,可以得到参数值随频率变化的规律,完成对较高频率下的磁致伸缩回线的预测,实现较高频率下磁致伸缩单值曲线的模拟。



**Figure 5.** Comparison diagram of simulated hysteresis loop measurements under different magnetic fluxes  
**图 5.** 不同磁通情况下的磁滞回线测量模拟对比图



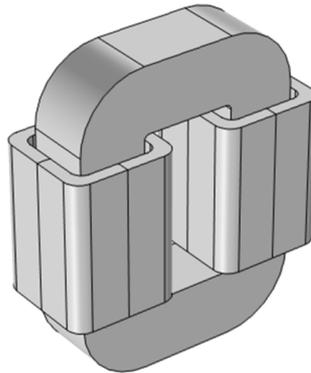
(a) 0.8 T 的磁致伸缩曲线实验与模拟对比图

(b) 1.2 T 的磁致伸缩曲线实验与模拟对比图

**Figure 6.** Comparison of experimental and simulated magnetostrictive curves at different flux densities**图 6.** 不同磁通密度时的磁致伸缩曲线实验与模拟对比图

### 3. 有限元仿真模型的建立

在有限元软件中建立一个与后续实验中使用的变压器的几何参数完全相同的非晶合金变压器有限元模型，如图 7 所示。

**Figure 7.** Numerical calculation model of amorphous core**图 7.** 铁心的数值计算模型

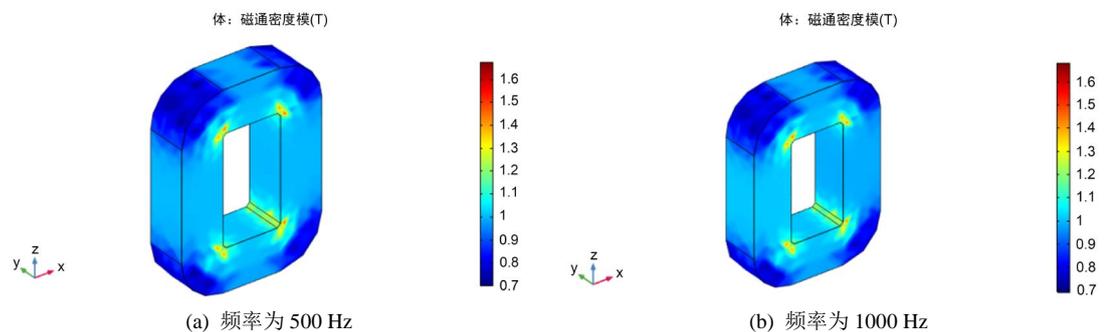
本节采用上文中得到的利用磁致伸缩模型预测出来的磁特性和磁致伸缩特性数据，作为变压器数值模型的基本输入参数，对高频条件下的变压器有限元仿真模型进行计算分析，直观的对高频情况下的仿真进行了展示。

由图 8 可知，500 Hz、1000 Hz 条件下铁心磁场计算中磁通密度的整体分布情况均匀，变化趋势相同，模型准确。

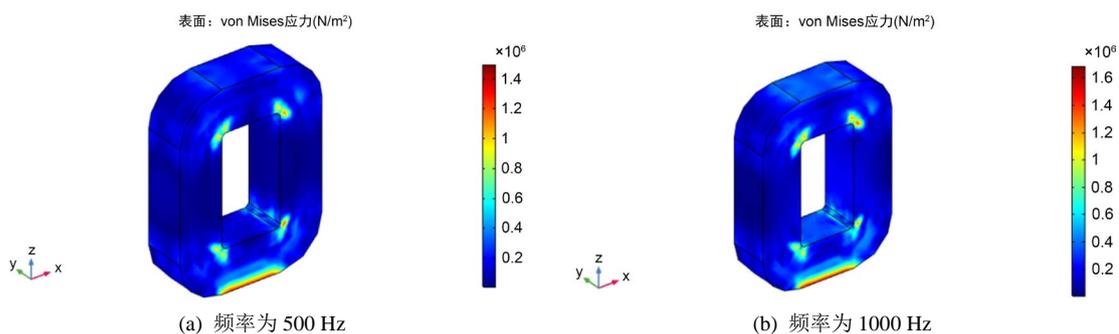
由图 9 可知，500 Hz、1000 Hz 条件下铁心机械场计算中应力的整体分布情况均匀，变化趋势相同，且随着频率的增加，应力数值整体变大，模型准确。

由图 10 可知，500 Hz、1000 Hz 条件下铁心声场计算中噪声的整体分布情况均匀，变化趋势相同，且随着频率的增加，噪声数值整体变大，模型准确。

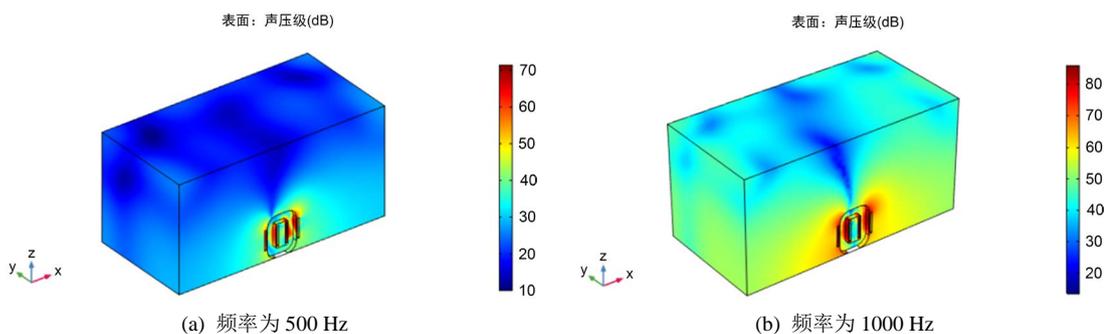
由于噪声的分布情况还不够直观，于是，选定两个方向对声场进行多切面处理，分别是纵切面和横切面，这使得噪声的等级分布更加直观。图 11 中图(a)和图(b)，分别对应纵切面和横切面的噪声声压级等级分布。



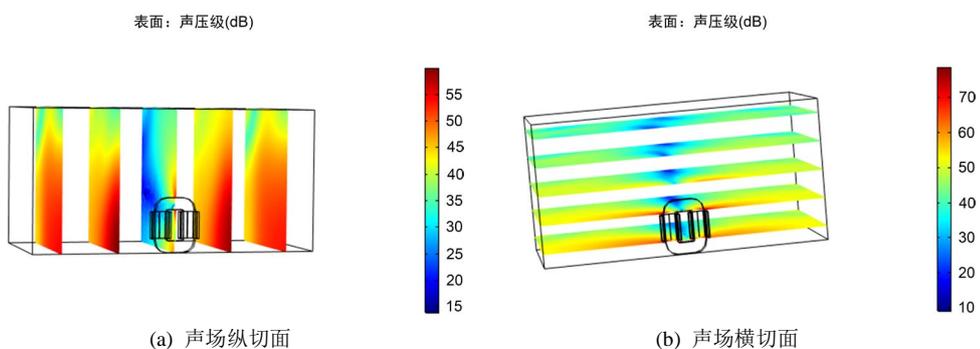
**Figure 8.** Calculation results of magnetic flux density of core  
**图 8.** 铁心的磁通密度计算结果



**Figure 9.** The stress calculation results of the core  
**图 9.** 铁心的应力计算结果



**Figure 10.** Calculation results of core noise  
**图 10.** 铁心的噪声计算结果



**Figure 11.** Multi-section results of core noise field  
**图 11.** 铁心噪声场多切面结果

综合考虑铁心的声场计算结果可得出，该样机的噪声辐射源主要集中在铁心两柱上侧的附近位置，且随着与铁心的距离越来越远，噪声值逐渐降低。

#### 4. 实验验证

搭建实验平台对非晶合金铁心的振动噪声数据进行测量采集，基本结构如图 12 所示，振动噪声测试平台应该包括测试铁心，激励和测试线圈，信号发生器和功率放大器，功率分析仪，振动噪声检测记录装置等，并选定监测点对其进行声波采集，与模型预测的数据进行对比。

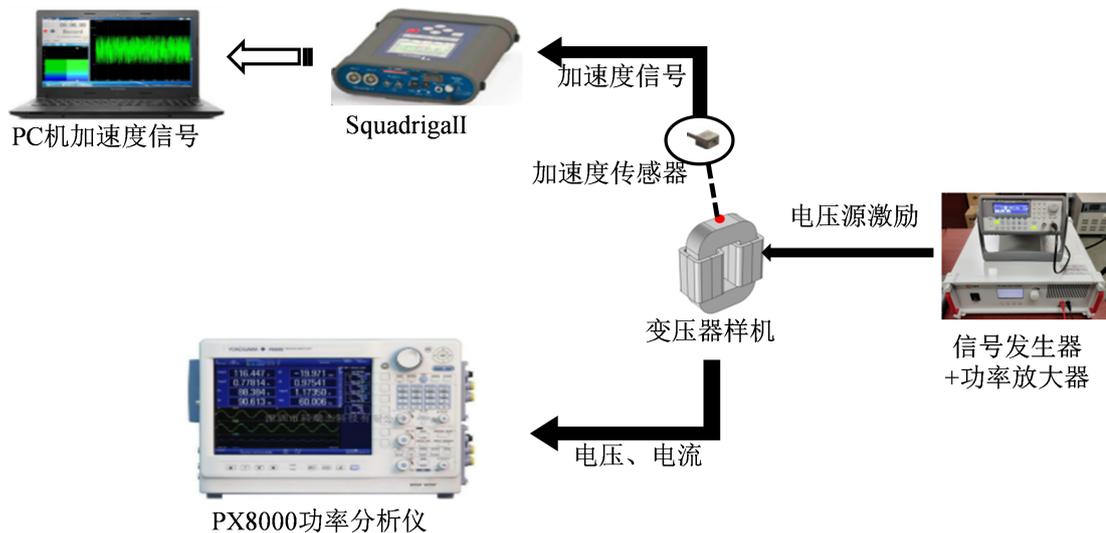


Figure 12. Experimental schematic diagram  
图 12. 实验原理图

本文中的振动噪声实验选择与仿真模型中相同的测量点，位于铁心中心顶部，振动加速度测量点的位置如图 13 所示。

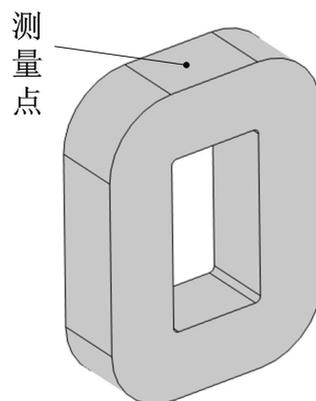


Figure 13. Vibration acceleration measurement point  
图 13. 振动加速度测量点

选取输入频率为 500 Hz 激励下的磁通密度达 1.2 T 时，测量点的位移变化如图 14 所示，可知主要振动方向为 Z 方向，另外两个方向的振动可忽略不计。在仿真数值模型中，利用测量的磁特性以及磁致伸缩单值曲线，可以得到与实验测点位置相同的三维截点处的位移测量值如图 15 所示。

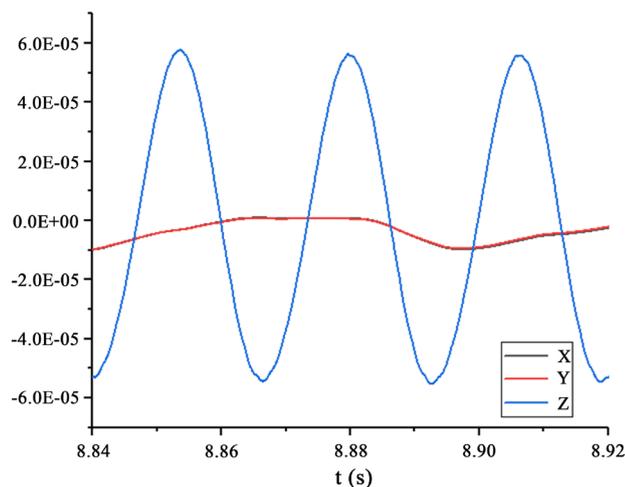


Figure 14. Displacement change of measuring point

图 14. 测量点的位移变化

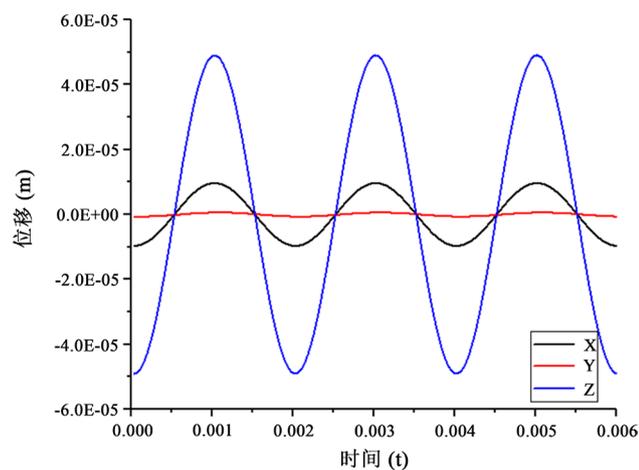


Figure 15. Displacement changes measured at three dimensional cut-off points

图 15. 三维截点处测得的位移变化图

综合图 14 和图 15，可以了解到，在实际测量和采用模型预测出的磁致伸缩数据建立的有限元仿真模型所得到的位于参考点的位置处的位移变化趋势是一致的。因此，预测模型是准确的，可以用于对实际工程应用的仿真。

在仿真数值模型中，选取几个噪声测量点，测量点位置如图 16 所示。

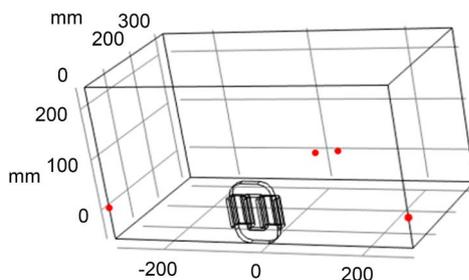


Figure 16. The distribution of noise measurement points

图 16. 噪声测量点的分布图

记录其噪声值，同时在实验时，利用噪声测量仪测量相应位置的噪声值，测量值与模拟值对比如表 1 所示。

**Table 1.** The noise value at the measuring point  
**表 1.** 测量点处的噪声值

| 测量点 | 测量值(dB) | 模拟值(dB) |
|-----|---------|---------|
| 1   | 59.6    | 60.3    |
| 2   | 56.2    | 57.2    |
| 3   | 57.6    | 58.2    |

由表 1 可知，将磁致伸缩模型计算得出的数据结果用于对变压器的有限元仿真，可以充分的实现对振动噪声的模拟。

## 5. 结论

本文建立的非晶合金的磁致伸缩预测模型，可以用于计算不同频率不同激励下的非晶合金磁致伸缩数据，在预测模型数据的基础上，建立了一个非晶合金变压器有限元模型进行振动噪声分析，并通过搭建不同频率下的非晶合金变压器的磁致伸缩测量实验系统，对不同频率下的磁特性与磁致伸缩特性进行实验测量分析。将测量结果与模型计算结果进行对比发现，随着频率的升高，铁心的振动噪声在逐渐增大，且最终噪声的误差小，论证了磁致伸缩预测模型的准确性，这对工程实践具有一定的指导意义。

## 参考文献

- [1] 武兰民, 程灵, 邱宁, 等. 配电变压器用非晶合金的研究进展及应用前景[J]. 热加工工艺, 2020, 49(12): 10-13.
- [2] Olowu, T.O., Jafari, H., Moghaddami, M., *et al.* (2021) Multiphysics and Multiobjective Design Optimization of High-Frequency Transformers for Solid-State Transformer Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **57**, 1014-1023. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3035129>
- [3] 李长云, 郝爱东, 娄禹. 直流偏磁条件下电力变压器振动特性研究进展[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 215-223.
- [4] Zhu., L., Li, J., Yang, Q., *et al.* (2020) An Improved Magnetostriction Model for Electrical Steel Sheet Based on Jiles-Atherton Model. *IEEE Transactions on Magnetics*, **56**, 1-4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2951824>
- [5] 祝丽花, 李晶晶, 朱建国. 服役条件下取向硅钢磁致伸缩模型的研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4131-4138.
- [6] 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.
- [7] Mizuta, T., Tani, Y. and Fujiwara, K. (2018) Magnetic Property of Amorphous Magnetic Thin Ribbon and Its Laminated Bulk under Tensile and Compressive Stresses. *IEEE Transactions on Magnetics*, **54**, 1-5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2829191>
- [8] 韩天衡, 祝丽花, 沙瑞, 等. 温度对非晶合金卷形铁心磁特性及振动的影响分析[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(11): 66-73.
- [9] Liu, D., Li, J., Noubissi, R.K., *et al.* (2019) Magnetic Properties and Vibration Characteristics of Amorphous Alloy Strip and Its Combination. *IET Electric Power Applications*, **13**, 1589-1597. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0137>
- [10] Jiles, D.C. and Atherton, D.L. (1984) Theory of the Magnetisation Process in Ferromagnets and Its Application to the Magnetomechanical Effect. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **17**, 1265. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/17/6/023>
- [11] Jiles, D.C. and Thoeke, J.B. (1992) Theory of Ferromagnetic Hysteresis: Determination of Model Parameters from Experimental Hysteresis Loops. *IEEE Transactions on Magnetics*, **5**, 3928-3930. <https://doi.org/10.1109/20.42480>
- [12] Annakkage, U.D., McLaren, P.G., Dirks, E., *et al.* (2000) A Current Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15**, 57-61.

<https://doi.org/10.1109/61.847229>

- [13] Kennedy, J. and Eberhart, R.C. (1995) Particle Swarm Optimization. *IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Western Australia, 27 November-1 December 1995, 1942-1948.  
<https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>