



中国电机工程学报
Proceedings of the CSEE
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

《中国电机工程学报》网络首发论文

题目: 夹紧力对非晶合金磁特性及铁心振动的影响研究
作者: 祝丽花, 石永恒, 杨庆新
DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191751
网络首发日期: 2020-04-24
引用格式: 祝丽花, 石永恒, 杨庆新. 夹紧力对非晶合金磁特性及铁心振动的影响研究. 中国电机工程学报. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191751>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

夹紧力对非晶合金磁特性及铁心振动的影响研究

祝丽花¹, 石永恒¹, 杨庆新²

(1. 天津市电工电能新技术重点实验室(天津工业大学), 天津市 300387

2. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津市 300131)

Effect of Clamping Force on Magnetic Properties and Core Vibration of Amorphous Alloys

ZHU Lihua¹, SHI Yongheng¹, YANG Qingxin²

(1. Tianjin Key Laboratory of ATEEE (Tiangong University), Tianjin 300387, China;

2. State Key Laboratory of EERI (Hebei University of Technology), Tianjin 300131, China)

ABSTRACT: In engineering, the overlap of the amorphous transformer core is mostly without in a free state, causing problems such as large vibration and debris falling off. In order to improve this problem, this paper studies the effect of clamping force on the magnetic and vibration characteristics of amorphous core. Firstly, the magnetic properties of amorphous alloy strip are measured and an experimental platform of magnetic properties of amorphous alloy roll core with clamping force is set up. The basic magnetization and magnetostriction characteristics of amorphous alloy roll core under different clamping forces are measured. Based on the measured characteristic data, the multi physical field coupling calculation is carried out for the small-scale amorphous prototype, and the magnetic flux and vibration distribution of the amorphous core under different clamping stress are obtained. In order to verify the accuracy of the analysis method and results, the vibration of the analysis prototype is measured, and the comparative analysis of the vibration displacement of different positions of the core is realized. The results of calculation and measurement show that the proper clamping force can effectively restrain the vibration of amorphous alloy roll core. Based on the electromagnetic vibration analysis of a small-scale amorphous prototype, the model was applied to a 500kVA amorphous distribution transformer. The vibration under different clamping stress was analyzed and the acceleration at multiple position on the core were measured at last. This paper provides a method for the pretreatment of the clamping force of amorphous transformer in engineering.

KEY WORDS : clamping force; amorphous core;

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51690181)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51690181).

magnetization properties; magnetostriction; electromagnetic vibration

摘要: 非晶配电变压器铁心搭卷部分工程上大多处于自由状态,造成该部分振动大、碎屑脱落等问题。为改进该问题,文本研究了夹紧力对非晶铁心磁特性及振动特性的影响。文中首先测量了非晶合金带材的磁特性并搭建了具有夹紧力作用的非晶合金卷形铁心磁特性实验平台,对其进行了不同夹紧力作用下基础磁化和磁致伸缩特性的测量。基于测量特性数据,对小型非晶样机进行了多物理场耦合计算,得到了非晶铁心在不同夹紧应力下磁通及振动分布。为验证分析方法和结果的准确性,对分析样机进行了振动的测量,实现了铁心不同位置振动位移的对比分析。计算和测量结果表明适当的夹紧力可有效地抑制非晶合金卷形铁心的振动。本文在对小型非晶样机电磁振动计算分析和实验对比的基础上,将模型应用于500kVA的非晶配电变压器,实现了对应的分析测量对比,为进一步工程上对非晶电力变压器铁心夹紧力的预处理提供理论支持和分析方法。

关键词: 夹紧力, 非晶合金, 磁化特性, 磁致伸缩, 电磁振动

0 引言

非晶合金材料以节能著称,非晶电力变压器相对硅钢变压器具有更低的空载损耗^[1],但非晶合金磁致伸缩系数大,这将导致非晶变压器在运行中铁心振动较大,噪声等级随之增加^[2]。电磁振动不仅影响设备的使用寿命,同时引起的噪声环境问题受到越来越多的关注。因此,如何设计制造出低振动噪声的非晶电力变压器已成为其推广应用中亟待解决的问题^[3]。

由于非晶合金单片带材硬度大,在卷制过

程中铁心产生内部应力不可避免^[4]。工程中采用退火工艺消除铁心的内在应力,以保证其稳定的磁特性。西班牙 K. L. Alvarez 等学者通过实验测量分析了不同温度和时间下退火处理对铁基非晶合金磁特性的影响^[5]。日本 T. Todaka 等学者利用二维磁化特性测量装置对退火后非晶样片的磁特性进行了测量,结果表明退火后非晶磁化各向异性表现很小,并且易磁化方向发生改变^[6]。日本 T. Mizuta 等学者 2018 年利用开发的非晶合金应力磁特性实验测量平台,实现了对非晶合金带材以及叠片非晶块 50MPa 拉力至 50MPa 压力下的磁特性测量,并提出非晶带材励磁过程中的最大磁场强度会随拉应力而减小,随压应力增大^[7]。

非晶合金的磁致伸缩特性是影响其变压器铁心振动的主要因素,也是分析非晶变压器振动噪声必须的基础特性数据^[8]。文献[9]基于压磁方程建立了磁致伸缩引起的非晶合金圆环铁心振动解析模型。通过测试不同加工工艺非晶合金铁心样品的振动,总结叠压和卷绕、浸漆和退火分布对非晶铁心振动的影响规律,确定了不同加工工艺非晶铁心振动的修正系数。文献[10]对卷绕式非晶铁心底部加入不同材料进行减振,通过测量对比分析了材料的减振效果。为考虑运行时铁心和绕组存在温升问题,文献[11]在测量不同温度下非晶卷形铁心磁化特性的基础上,对铁心振动加速度进行了计算测量分析,总结了温度对铁心振动的影响。文献[12]提出了非晶铁心扇形接缝、铁心表面涂覆环氧树脂胶水以约束铁心张力,以及其面和周围增加吸声材料等方法对非晶变压器进行降噪。

前期研究表明非晶铁心磁特性对应力比较敏感,但目前制造非晶电力变压器时,放置绕组后非晶铁心的上轭搭迭部分处于自由状态,该部分振动较大,对铁心夹紧力大小及引起的振动效果工程上暂无定论,相关研究报告鲜少。因此,为研究夹紧力对非晶合金铁心的影响,本文对非晶带材和非晶卷绕式铁心分别进行了磁特性测量,获得了不同夹紧力下铁心的磁化和磁致伸缩特性。基于测量数据分析了非晶铁心不同夹紧作用力下磁场及应力振动情况,并对样机不同夹紧力下铁心的振动情

况进行了测量分析。最后总结分析了夹紧力作用对非晶铁心振动的影响。

1 非晶合金磁特性测量

1.1 非晶合金带材的磁特性测量

非晶合金带材单片厚度为 0.02-0.03 mm,其磁化特性可通过单片磁化特性测量系统(SST)测量;由于非晶带材极薄且质软,进行磁致伸缩测量时不能保持其固定形状;为便于测量,通过专用带材粘合装置对多片非晶粘合处理,利用磁致伸缩特性测量设备对加工后的非晶合金样片进行磁致伸缩测量^[13]。磁致伸缩测量主体如图 1 所示,通过激光对测量样片微位移进行测量,施压装置可对样片实现 0-200 N 的拉力,整套装置工作在用空气压缩机充气的悬浮工作平台上,以隔断外部环境对测量系统的干扰。

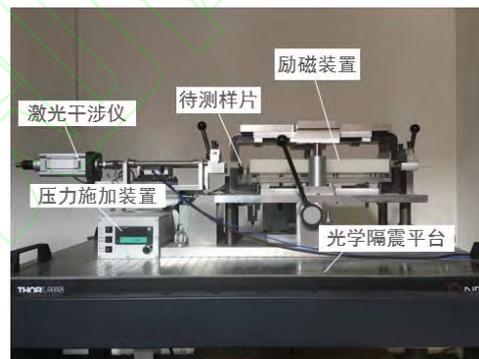


图 1 磁致伸缩测量装置

Fig.1 Magnetostrictive measuring device

非晶合金带材基本磁化 BH 特性曲线及相对磁导率测量结果如图 2 所示,在 0-1 T 时磁导率较低,单片带材饱和磁通约为 1.5 T,非晶电力变压器的铁心多工作于 1.2T 左右。

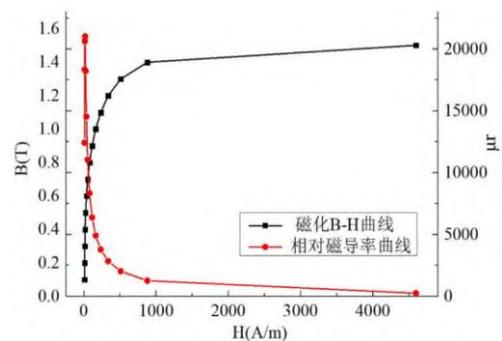


图 2 非晶合金带材磁化和相对磁导率特性

Fig.2 B-H and relative permeability of amorphous alloy

铁磁材料的磁致伸缩特性以“蝴蝶曲线”

为代表，在考虑磁致伸缩效应的数值计算时，磁致伸缩与磁通密度的关系通常用单值曲线表示，通过引入磁致伸缩伸长最大值与缩短最大值之差即磁致伸缩峰峰值 λ_{pp} 来表示。本文对非晶带材的磁致伸缩特性进行测量，其结果如图 3 所示，结果表明在磁通密度 1.2T 时 λ_{pp} 数值达到约 $23\mu\text{m/m}$ ，针对硅钢片的相关测量研究表明常用取向和无取向硅钢在铁心工作磁密下的磁致伸缩小于 $10\mu\text{m/m}$ ^[14,15]，可见非晶合金材料磁致伸缩高于一般硅钢材料。

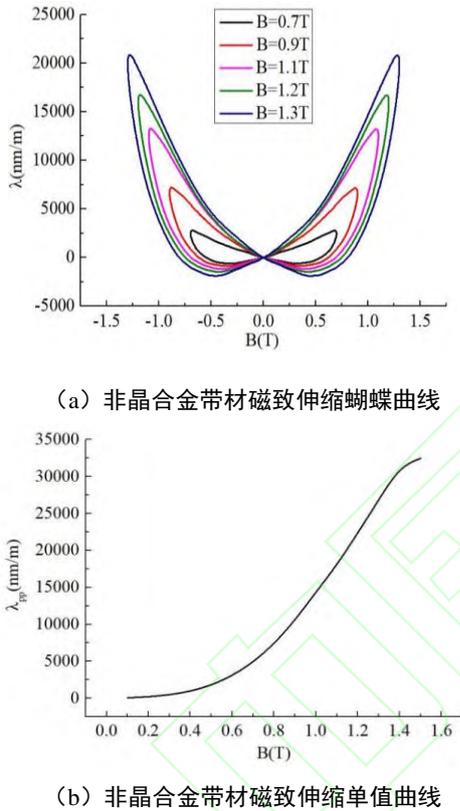


图 3 非晶合金带材磁致伸缩特性测量结果

Fig.3 Magnetostrictive curves of amorphous alloy strip

1.2 夹紧力下非晶铁心磁特性测量

为准确分析夹紧力对非晶合金铁心磁特性的影响，本文搭建了夹紧应力下非晶铁心磁特性测量平台，测量结构如图 4 所示。由于工程中非晶变压器铁心经过了退火处理，本文所用的非晶小型测卷绕式铁心也经过退火处理，绕组采用铜芯漆包线，为避免绕组振动对铁心振动测量产生干扰，绕组皆绕制在环氧树脂套筒骨架上；两侧绕组匝数相同，由一次侧绕组对非晶铁心励磁，通过功率分析仪采集二次侧感应电压。对非晶铁心上部施加压力并在底部加有垫板，通过压力传感器记录压力值。

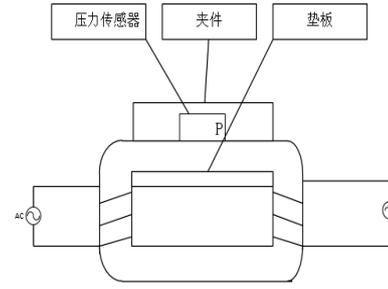


图 4 压力下非晶铁心磁特性测量结构图

Fig.4 Magnetic characteristics measurement of amorphous core under pressure

为使夹紧力均匀分布在铁心上部两侧，在铁心与夹件中部垫入亚克力板，并在铁心底部加有垫板。在亚克力板中间位置开槽将压力传感器置入其中，对应压力大小数显如图 5 所示。

调节夹紧力并用传感器记录压力值，分别依据安培环路定律和电磁感应定律，通过功率分析仪采集一次侧绕组励磁电流及二次侧感应电压并结合铁心参数，经过式(1)和(2)简单连续计算获得各组夹紧力下的铁心磁化曲线。

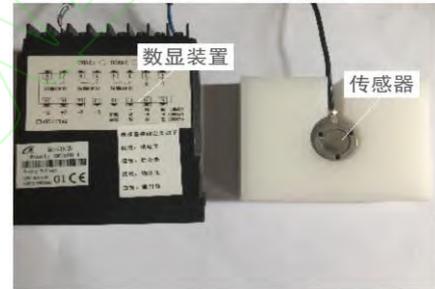


图 5 压力读取装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of pressure reading device

$$H = \frac{N_1 I}{l_c} \quad (1)$$

$$B = \frac{U}{4.44 \cdot f A_c N_2} \quad (2)$$

式中， l_c 为铁心有效磁路长度； I 为励磁侧电流； N_1 为励磁侧线圈匝数。 U 为感应侧电压； f 为激励频率； A_c 为铁心横截面积， N_2 为感应侧线圈匝数。

磁致伸缩 λ 定义为电工钢片磁化时长度的增量 ΔL 与两点间距离 L 的比值，即：

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

根据线磁致伸缩理论，本文采用多普勒激光测振仪对非晶铁心受夹紧力处顺磁方向磁致伸缩进行测量，其余两方向磁致伸缩量级取

磁化方向量级的一半。通过测量两点间的相对位移 ΔL 与两点间距离 L 在不同磁通密度下的比值可归算得出非晶铁心在无夹紧力及不同夹紧力作用下的磁致伸缩特性曲线,测量系统如图6所示。无应力及多组不同夹紧力作用下非晶合金卷形铁心的磁化特性和磁致伸缩特性测量结果分别如图7和图8所示。

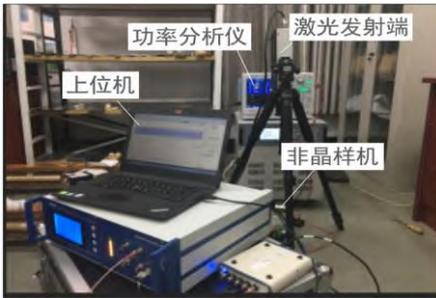


图6 夹应力下铁心磁特性测量系统

Fig. 6 Measurement system of magnetic properties of iron core under stress

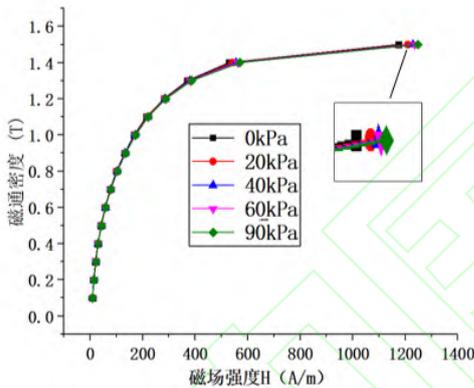


图7 夹应力下磁化特性

Fig. 7 Magnetization curves under clamping stress

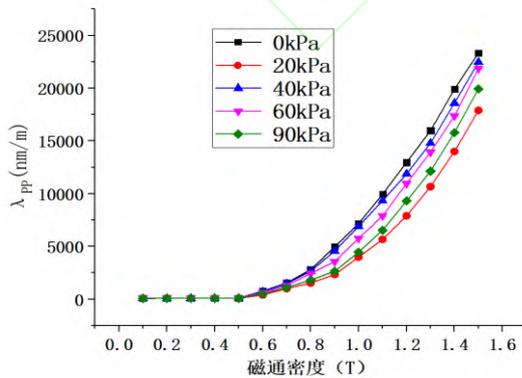


图8 夹应力磁致伸缩特性

Fig. 8 Magnetostrictive curves under clamping stress

非晶卷形铁心在不同夹紧力作用下磁化特性测量结果显示低磁通时非晶铁心磁化特

性受夹紧力影响较小,高磁通时随夹紧力的增加其磁导率略有降低。图8表明非晶合金磁致伸缩特性受夹紧力影响较大,特别是在磁通密度高于0.7T时夹紧应力影响更明显,且顺磁方向铁心磁致伸缩效应随夹紧力的增加呈现非线性变化,磁致伸缩量级决定了在同等磁通密度下材料形变的大小,依据弹性力学可由非晶铁心应变计算分析应力及振动,实现非晶铁心磁场和机械场的耦合计算。

2. 样机模型数值计算

2.1 磁机械耦合分析方法

非晶配电变压器工作于工频,麦克斯韦方程组是求解磁场问题的基础,在磁场分析中,磁感应强度 B 由磁矢位 A 的旋度得到,位移电流可忽略不计,磁矢量的控制方程为:

$$\rho^{-1} \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A) = J \quad (4)$$

式中, J 是绕组的电流密度, ρ 表示电阻率, μ_0 和 μ_r 分别为真空磁导率和相对磁导率。

电磁振动计算依据弹性力学理论,忽略非晶样机结构的阻尼项,其振动控制方程为:

$$M \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + K u(t) = F(t) \quad (5)$$

式中, M 和 K 分别表示质量矩阵和刚度矩阵, $u(t)$ 是待求位移, $F(t)$ 是作用力,文中非晶样机包含外部压力和电磁作用力。

对于非晶配电变压器类电力设备的铁心来讲,电磁作用力包括麦克斯韦力 f_{mw} 和磁致伸缩力 f_{ms} 。

$$\begin{aligned} F_m &= f_{mw} + f_{ms} = \int_s T dS + \int_s \sigma_{ms} dS \\ &= v_0 \int_s \left\{ \int_s (n \times B) B - \frac{1}{2} B^2 n dS \right\} dS + \int_s D \varepsilon_{ms} dS \end{aligned} \quad (6)$$

式中, T 表示麦克斯韦应力张量; D 表示弹性张量,由铁心材料的杨氏模量和泊松比求得; ε_{ms} 为磁致伸缩应力张量,可由测量的 B - λ_{pp} 曲线通过三次样条插值得到。

2.2 非晶铁心有限元模型

以夹紧应力下测量的磁化和磁致伸缩特性数据为基础,利用多物理场耦合计算分析卷式非晶铁心样机的电磁振动。非晶变压器样机铁心具体参数如表1所示,对应三维有限元计算模型如图9所示。

表 1 非晶合金变压器参数

Tab.1 Amorphous Alloy Transformer Parameters

铁心类型	非晶合金卷绕式
叠厚 A	25mm
窗宽 B	40mm
窗高 C	85mm
厚度 D	85mm

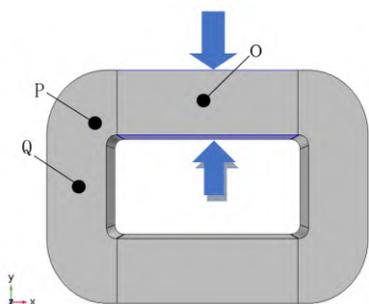


图 9 非晶铁心模型

Fig. 9 Amorphous core structure

2.3 磁-振动计算结果

工程上非晶电力变压器运行时其铁心工作磁通密度为 1.2T 左右, 本文非晶铁心的设计工作磁密取为 1.2T。在对小型样机电磁振动计算时分别引入对应不同夹应力下的磁化和磁致伸缩特性数据, 在相同的绕组激励条件下, 铁心中磁通密度分布如图 10 所示。

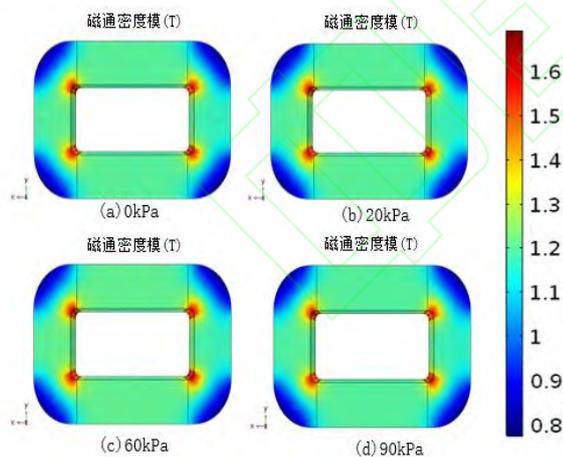


图 10 不同夹应力下铁心磁通分布

Fig. 10 Magnetic flux distribution of the core under different clamping stress

由图 10 磁场计算结果可知, 在铁心内转角处磁通密度较大, 在外拐角处磁密较小; 夹应力对整体铁心磁通密度分布影响不大, 这是因为铁心磁化受夹应力影响较小。

在磁场计算准确的基础上, 考虑磁致伸缩效应计算其等效作用力, 对不同夹应力下非晶变压

器铁心进行固体力学计算分析。对铁心振动分析时铁心底部定义为固定约束, 上部施加夹紧力。为使计算模型与实验样机条件接近, 将受夹应力作用铁心模型分为两部分, 一部分为铁心上部受力部分特性采用夹紧力下磁致伸缩测量结果, 外部条件设定为对应压力下的载荷, 压力施加方式如图 9 所示, 压力值与磁致伸缩数据保持对应关系; 不受力部分代入无应力的磁特性数据。在相同绕组激励下, 不同夹应力下的铁心应力分布结果如图 11 所示。

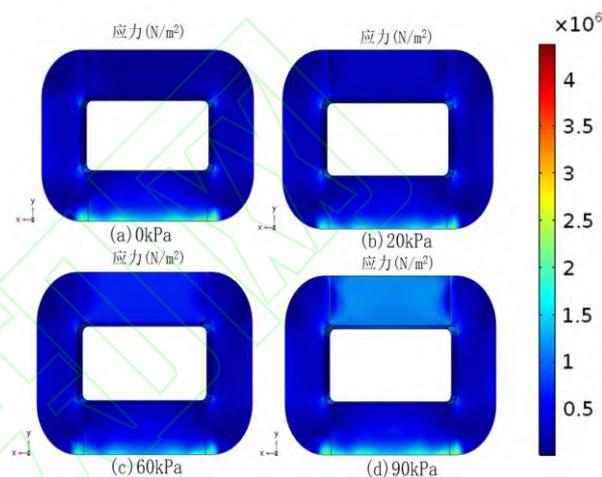


图 11 不同夹应力下铁心应力分布

Fig. 11 The stress distribution under clamping stresses

计算结果表明铁心底部固定约束处应力分布较大, 不受应力部分的铁心随应力变化较小; 由于磁致伸缩特性随受夹紧力作用变化明显, 受夹紧力作用部分铁心的应力分布受外力变化和磁致伸缩影响共同作用发生较大变化; 总体而言铁心应力分布随夹紧力的增大而增大。

为更直观分析夹紧力对铁心磁场和应力场分布的影响, 从点的计算结果看应力的影响。在铁心上选取三个点 O、P、Q 进行比较, 三点的位置如图 9 所示, 其中 O 点位于铁心受力区域, P 点位于铁心内侧转角磁通较高区域, Q 点位于铁心立柱中间区域, 代表变压器铁心的主要工作区域。

提取 O、P、Q 三个参考点的计算结果来对比分析各区域磁通及应力受夹紧力影响。在相同激励下, 三个参考点的磁通密度模和应力大小计算结果如表 2 所示; 不同夹应力下点 O 处三轴振动加速度计算结果如图 12 所示。

表 2 三点的磁通和应力大小

Tab.2 Magnetic Flux and stress of points O P and Q

夹应力 (kPa)	点 O		点 P		点 Q	
	磁密	应力	磁密	应力	磁密	应力
	(T)	(N/m ²)	(T)	(N/m ²)	(T)	(N/m ²)
0	1.139	1.05 E5	1.370	1.49 E5	1.139	2.18 E5
20	1.133	2.75 E5	1.359	1.62 E5	1.131	1.97 E5
60	1.129	6.82 E5	1.351	2.03 E5	1.128	2.17 E5
90	1.128	9.86 E5	1.350	2.55 E5	1.127	2.28 E5

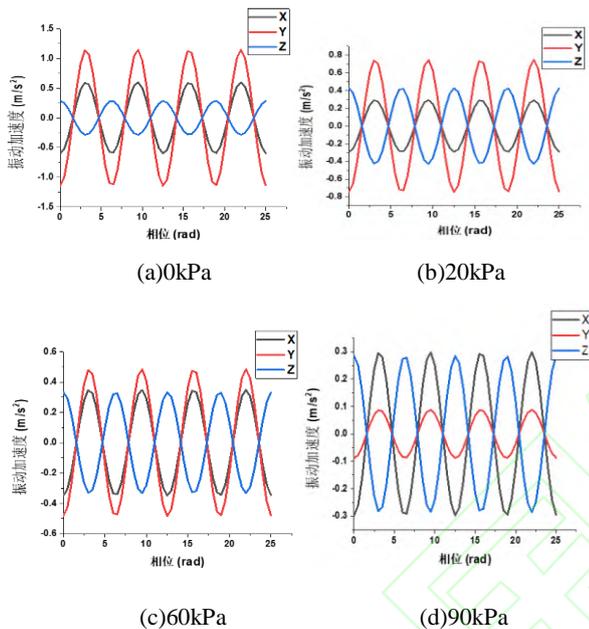


图 12 不同夹应力下 O 点振动加速度计算结果

Fig.12 Acceleration vs clamping stress from calculation

从表 2 点 O 与点 Q 处的计算结果可看出磁通密度较低时受夹应力作用影响很小；磁通密度分布较大的 P 点表明非晶铁心在高磁通时受夹应力作用影响较大。由此可得出局部施加夹应力对铁心磁通分布影响较小，仅在高磁通时铁心磁导率略有降低，与夹应力对磁化特性影响相同。夹应力施加后分析铁心应力受夹应力影响，从点 O 处计算结果可看出受夹应力作用其应力值改变较大，由于磁致伸缩效应改变及两侧压力的综合作用下，导致其应力值随夹应力增加线性增大。铁心受力区域应力值改变较大导致铁心整体应力分布发生改变，点 P 和点 Q 处随夹应力的增大两点处应力值变化较小。

计算结果图 12 表明无应力时点 O 在铁心夹应力 Y 轴方向振动加速度幅值约为 1.15 m/s²，受夹应力磁致伸缩效应的改变和夹应力的综合作用，铁心在夹应力方向加速度峰值随夹应力的增

大而衰减，当夹应力到 90kPa 时 Y 轴振动加速度幅值减小到 0.09 m/s²。在不同夹应力作用下的铁心顺磁 X 轴方向与铁心厚度 Z 轴方向振动加速度呈现不同程度的改变。

3. 振动测量

为验证模型数值计算结果的准确性，本文对非晶变压器铁心在相同激励、不同夹应力作用下的振动分别进行测量分析，通过上位机对测量数据进行采集并记录，测量系统如图 13 所示。

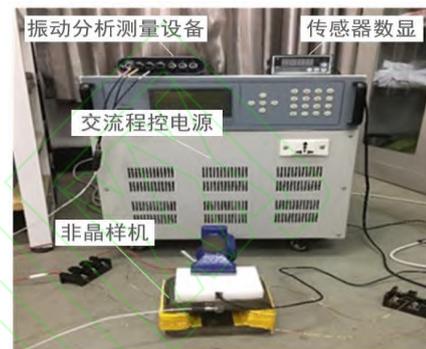


图 13 小型样机振动测量系统图

Fig.13 Vibration measurement system of prototype

在铁心上部选取与模型中参考点 O 位置。在铁心磁通约为 1.2T 时对不同夹应力作用下测点处三轴振动加速度进行测量，三维振动传感器三轴方向与计算模型中保持一致。不同夹应力作用下点振动加速度测量实时结果如图 14 所示。

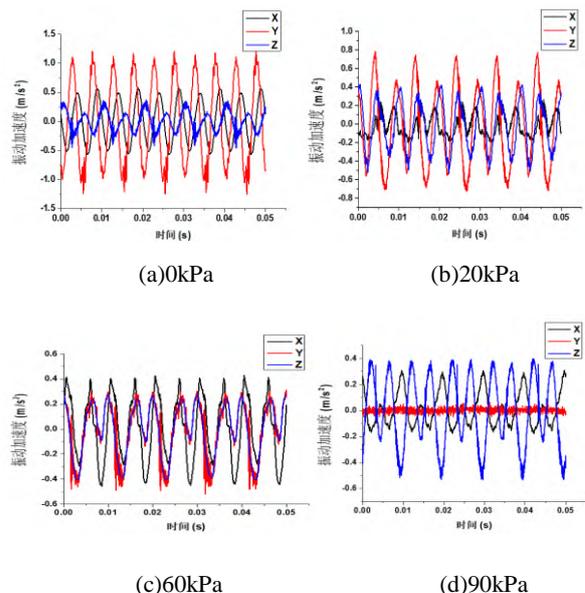


图 14 不同夹应力下 O 点振动测量结果

Fig. 14 Measurement results of point O vibration under different clamping stress

加速度测量结果表明在夹紧力作用下铁心振动情况变化明显。测点 X 轴为铁心顺磁方向，其振动随夹紧力的增大呈现不规则变化。Y 轴为受力方向，随夹紧力的增大其振动逐渐减小。铁心厚度 Z 轴方向受夹紧力作用影响较小。不同夹紧力下点 O 处各方向振动加速度幅值计算和测量大小如表 3 所示。

表 3 O 点振动加速度幅值

Tab.3 The Vibration Acceleration Amplitude of Point O

夹紧力 (kPa)	X(m/s ²)		Y(m/s ²)		Z(m/s ²)	
	测量值	计算值	测量值	计算值	测量值	计算值
0	0.5	0.59	1.2	1.14	0.3	0.28
20	0.2	0.29	0.78	0.74	0.4	0.4
60	0.28	0.34	0.4	0.48	0.28	0.33
90	0.3	0.29	0.03	0.09	0.38	0.28

通过表 3 所示结果表明对于点 O 处，夹紧力对 Y 轴即夹紧力作用方向振动加速度影响最大，对顺磁 X 轴方向和铁心厚度 Z 方向影响呈现非线性。为直观反映非晶铁心在夹紧力作用下铁心振动变化情况，对测点 O 处在不同夹紧力下振动总加速度的测量值与计算值进行直接对比，其结果如图 15 所示。

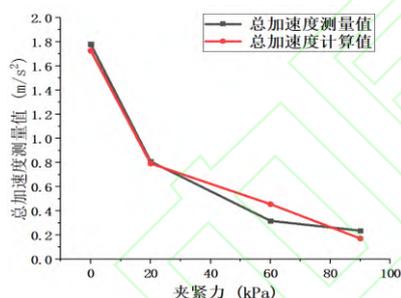


图 15 O 点总加速度幅值随夹紧力变化曲线

Fig. 15 The total acceleration amplitude of point O under different clamping force

受夹紧力影响 Y 轴方向振动对总加速度贡献减小，但其余两方向与夹紧力大小并非线性关系，通过夹紧力减小 Y 轴振动时必须考虑应力对其余两向振动的影响。在工频正弦激励下，理论上非晶铁心振动频率集中在 100Hz 及其倍频。为分析夹紧力作用对非晶铁心振动频率的影响，将无应力及 90 kPa 夹紧力作用下的铁心振动数据进行傅里叶变换得出其频谱分布分别如图 16 和图 17 所示，其中 Ch3 测量铁心顺磁方向对应模型中 X 轴，Ch4 指铁心厚度方向对应 Z 轴，Ch5 则指夹应力作用方向对应模型中 Y 轴。

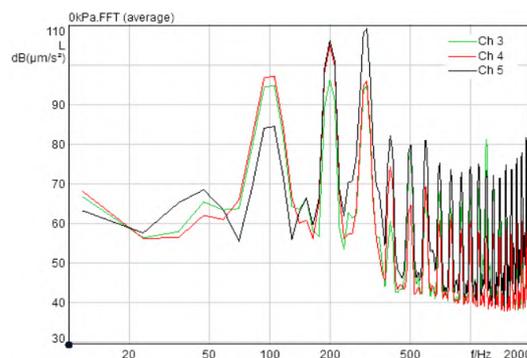


图 16 无夹紧力时振动频谱分布图

Fig. 16 Spectrum distribution without clamping force

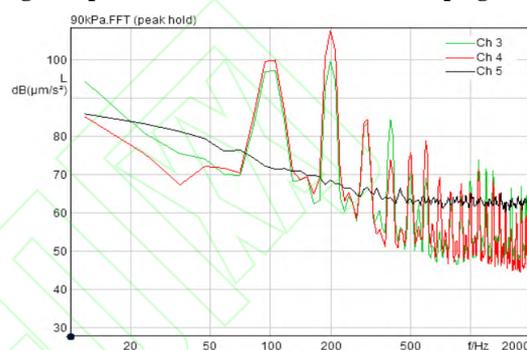


图 17 90kPa 夹紧力时振动频谱分布图

Fig. 17 Spectrum distribution under 90 kPa

由频谱分布图可知，在工频正弦激励条件下无应力作用时铁心三轴振动频谱皆集中在 100 Hz 及其倍频，在 90 kPa 夹紧力作用下，受力方向振动频谱发生突变，其振动频率由主振 100 Hz 及倍频变为非线性，随频率的增加逐渐衰减，其余两方向振动频率受应力影响较小。通过对非晶合金卷形铁心测点处在不同夹紧力下振动加速度及振动频谱的分析，可得出夹紧力的变化会影响其相同工作状态下的电磁振动。非晶合金卷形铁心由多片带材层叠而成，对其施加夹紧力可有效地抑制对应力方向振动，但也必须考虑夹紧力对每片带材磁致伸缩量的影响，选取适当的夹紧力可有效地减小变压器运行过程中铁心的振动。

4. 非晶配电变压器振动分析与测量

为使实验更好的结合工程应用，在实验室小型非晶样机电磁振动计算和实验测量对比分析的基础上，针对 500kVA 非晶合金配电变压器进行振动特性计算和测量分析。该样机设计工作磁通密度 1.2T，依据工程样机参数建立的数值计算模型如图 18 所示，其铁心的磁通密度有限元计算结果如图 19 所示。

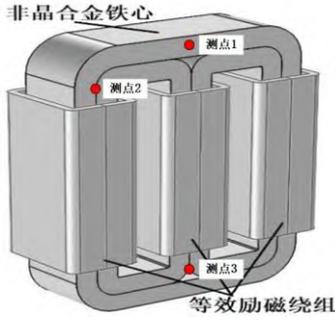


图 18 非晶干式变压器工程样机模型

Fig.18 The amorphous dry-type transformer model

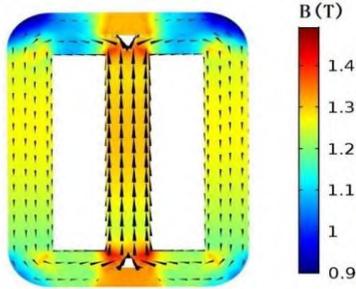
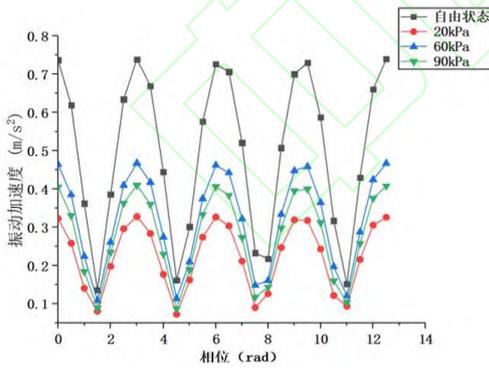


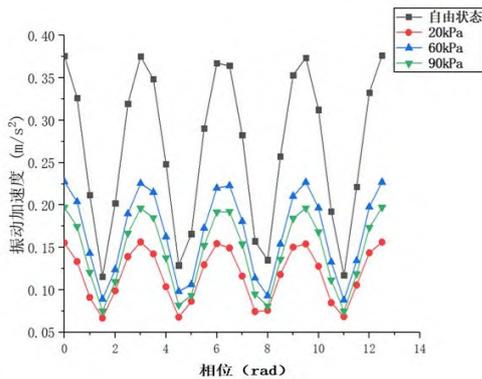
图 19 铁心磁密分析结果

Fig.19 The magnetic flux density of the core

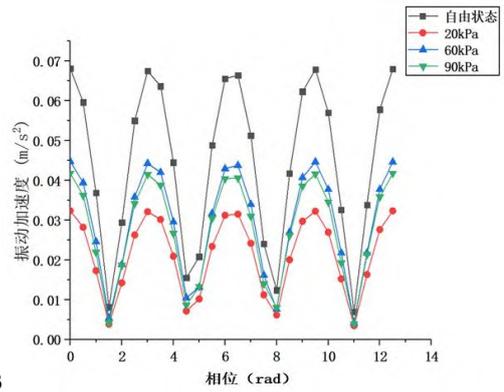
在确定磁场分析正确的基础上，进行电磁振动分析。计算时同样分别采用不同夹紧力下磁致伸缩测量数据以分析夹紧力对铁心振动的影响。为明确表达铁心的振动信息，分别提取铁心的上轭，转角以及底部三个点，位置如图 18 所示，三点在不同夹应力下的振动计算结果如图 20 所示。



(a)点 1



(b)点 2



(c)点 3

图 20 不同测点处振动加速度计算结果

Fig. 20 Calculation results of vibrations of the points

从图 20 的计算结果可以看出点 1 处振动受夹紧力作用影响最大，自由状态下其峰值约为 0.72m/s^2 ，受夹紧力影响不同应力作用下振动峰值均发生改变。由于铁心振动主要为磁致伸缩振动，受夹紧力作用磁致伸缩效应发生改变，因此振动加速度峰值随磁致伸缩量级的改变呈现不同程度变化。测点 3 处靠近铁心底部，而在本文中将铁心底部定位固定约束，因此与点 1 相比，其振动量级较小。为验证计算结果的准确性，通过振动分析仪对非晶变压器样机铁心额定工作磁密下各测点处的振动加速度进行测量，振动测量系统如图 21 所示，非晶配电变压器工作于空载状态，工程样机装配好绕组变压器后其铁心上轭部分处于自由状态，对应图 18 所示 3 个测试点的振动加速度测量时域结果如图 22 所示。根据非晶干式变压器铁心选取点处振动加速度数值计算和实验测量结果，3 个测试点不同状态下的振动加速度幅值对比结果如表 4 所示。

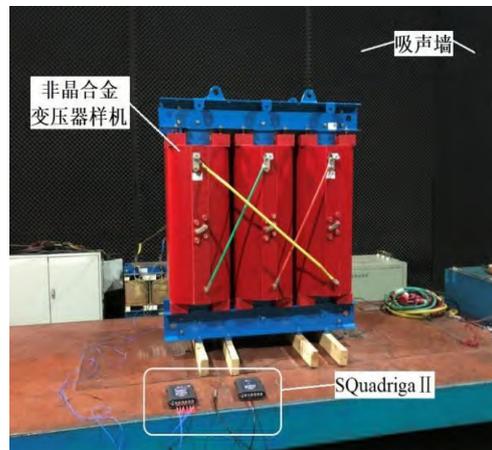


图 21 工程样机振动测量实验系统

Fig.21 The vibration measurement system

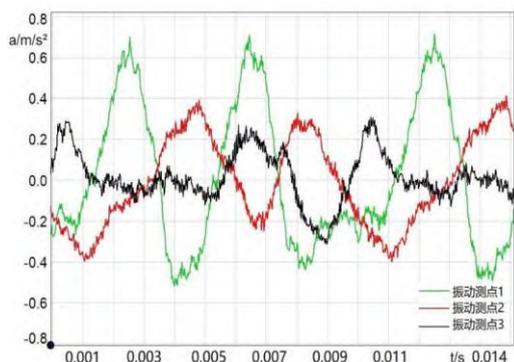


图 22 工程样机无压力下铁心各测点振动加速度分布

Fig. 22 Acceleration distribution of points without pressure in engineering prototype

表 4 测点振动加速度计算与测量值

Tab.4 Acceleration analysis and measurement results

振动测点	点 1	点 2	点 3
分析值	(m/s ²)	(m/s ²)	(m/s ²)
自由状态测量值	0.67	0.38	0.24
自由状态计算值	0.72	0.37	0.06
20kPa 夹紧力计算值	0.33	0.15	0.04
60kPa 夹紧力计算值	0.47	0.23	0.048
90kPa 夹紧力计算值	0.4	0.19	0.045

点 1 与点 2 处振动计算结果与测量结果基本一致，点 3 处振动加速度测量值与计算值差异较大，由于数值模型中样机底部加有固定约束，固定约束将强制振动量约束至零，而实验工程样机底部则是垫块，与数值模型相比其底部达不到理想的约束效果，导致点 3 处振动计算结果小于其测量值。计算结果表明夹紧力作用会有有效的抑制非晶铁心的电磁振动，相比于非晶卷形铁心，用于装配绕组的铁心搭叠区域更脆易碎，通过施加夹紧作用力减小铁心振动时必须考虑铁心的承受力，避免出现铁心碎裂脱落等情况。

5. 结论

本文依据非晶配电变压器铁心结构特点搭建了夹应力下磁特性实验平台，完成了对非晶合金卷形铁心在不同夹紧力作用下的基础磁化及磁致伸缩特性测量。实现了非晶卷型变压器的磁场和应力振动计算分析，并测量了样机铁心相同工作磁密下，不同夹紧力作用下的振动情况，对比分析了其加速度和频谱变化，得到夹紧力对非晶合金卷形铁心振动的影响如下：

(1) 非晶合金卷形铁心局部施加夹紧力，对

其磁化特性影响较小，仅在高磁通时其磁导率略有降低；但夹紧力对非晶铁心磁致伸缩效应影响较大，呈现非线性变化。

(2) 通过不同夹紧力下非晶铁心振动计算和测量对比分析，验证了磁-机械耦合数值计算结果的合理性。计算与实验结果对比分析表明非晶合金在夹紧力作用下其振动变化较为显著，受力方向振动加速度随夹紧力的增大而减小，但磁化方向振动与夹紧力呈现非线性关系。因此可得出采取适当夹紧力可有效的抑制非晶合金卷形铁心运行过程中的振动。

(3) 对 500kVA 非晶合金干式变压器铁心振动进行了计算和测量，依据小型样机铁心磁特性测量结果对电力设备进行分析，结果表明了模型的正确性，不同应力下的分析为非晶配电变压器铁心的振动控制提供有效的分析和参考方法。

后期将进一步设计实施对非晶配电变压器铁心施加一定夹紧力，并对其进行实验研究。本文的研究结果为计算评估非晶变压器电磁振动提供理论依据，为开展应力下非晶合金铁心设备的减振降噪研究提供分析方法。

参考文献

- [1] 杨中地, 武颖. 非晶合金变压器[J]. 变压器, 2007, (7): 1-8.
Yang Zhongdi, Wu Ying. Amorphous alloy transformer [J]. Transformer, 2007, (7): 1-8 (in Chinese).
- [2] 刘建华, 李永新, 杨国新. 浅谈降低非晶合金变压器噪声的措施[J]. 变压器, 2018, 55(6): 39-40.
Liu Jianhua, Li Yongxin, Yang Guoxin. Brief discussion on measures to reduce noise of amorphous alloy transformer [J]. Transformer, 2018, 55 (6): 39-40 (in Chinese).
- [3] Sakda S, Anthony J M, Philip I A, et al. Magnetostriction anisotropy and rotational magnetostriction of a non-oriented electrical steel[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(2): 302-305.
- [4] Wu S N, Tang R Y, Tong W M, et al. Analytical model for predicting vibration due to magnetostriction in axial flux permanent magnet machines with amorphous metal cores[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(8): 1-8.
- [5] Alvarez K L, Martin J M, Ipatov M, et al. Magnetic

- properties of annealed amorphous Fe72.5Si12.5B15 alloy obtained by gas atomization technique[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11), Art no.2002405.
- [6] Ueno S, Todaka T, Enokizono M. Measurement of vector magnetic properties of Fe - Si - B amorphous material[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 3188-3191.
- [7] Mizuta T, Tani Y, Fujiwara K. Magnetic property of amorphous magnetic thin ribbon and its laminated bulk under tensile and compressive stresses[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): Art no.6001005.
- [8] 钟星鸣, 姚小虎, 韩强, 等. 非晶合金变压器铁芯振动的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(17): 4934-4939.
Zhong Xingming, Yao Xiaohu, Han Qiang, et al. Experimental study on vibration of amorphous alloy transformer core [J]. Science and technology and engineering, 2009, 9(17): 4934-4939 (in Chinese).
- [9] 吴胜男, 唐任远, 韩雪岩, 佟文明, 赵森磊. 磁致伸缩引起的非晶合金铁心振动解析计算及影响因素[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 73-82.
Wu Shengnan, Tang Renyuan, Han Xueyan, et al. Analytical calculation and influence factors of amorphous alloy core vibration caused by magnetostriction [J]. Journal of Electrical Technology, 2016, 31 (20): 73-82 (in Chinese).
- [10] Du B X, Liu D S. Dynamic behavior of magnetostriction-induced vibration and noise of amorphous alloy cores[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(4): 7208708.
- [11] 韩天衡, 祝丽花, 沙瑞, 石永恒, 张露予. 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: 1-10.
Han Tianheng, Zhu Lihua, Sharui, Shi Yongheng, Zhang Luyu. Analysis of the influence of temperature on magnetic properties and vibration of amorphous alloy coil core [J]. New technology of electrical and electrical energy: 1-10 (in Chinese).
- [12] 崔鹤松. 非晶合金变压器的噪声特性及降噪措施研究[J]. 电器工业, 2018(9): 76-78.
Cui Hesong. Study on noise characteristics and noise reduction measures of amorphous alloy transformers[J]. Electrical Industry, 2018(9): 76-78 (in Chinese).
- [13] Magnetic materials - Part 3 : Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of a single sheet tester (IEC 60404-3: 1992+A1: 2002+A2: 2009)[S], Corrigendum to DIN IEC 60404-3: 2010-05.
- [14] 张艳丽, 孙小光, 谢德馨, 等. 无取向硅钢片各向异性磁致伸缩特性模拟[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4731-4736.
Zhang Yanli, sun Xiaoguang, Xie Dexin, et al. Simulation of anisotropic magnetostriction of non-oriented silicon steel sheet [J]. Chinese Journal of electrical engineering, 2014, 34 (27): 4731-4736.
- [15] Sakda S, Anthony J M, Philip I A. Magnetostriction in grain-oriented electrical steels under AC magnetostriction at angles to the rolling direction[J]. IET Electric Power Applications, 2016,10(11): 932-938.



祝丽花

祝丽花 (1984), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为工程电磁数值计算, 电工装备振动噪声分析及减振降噪技术, Email: zhulihua@tjpu.edu.cn;

石永恒 (1994), 男, 研究生, 研究方向为非晶合金磁特性及变压器振动噪声分析, Email: 467698159@qq.com;

杨庆新 (1961), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为工程电磁场数值计算, Email: qxyang@hebut.edu.cn;