

基于三维磁特性电抗器电磁振动分析

为准确分析评估电抗器电磁振动噪声大小, 准确的三维磁特性是开展计算分析的数据基础。在利用课题组研发的测量电工磁性材料三维磁特性的装置测量获得无取向硅钢立方叠片三维磁特性的基础上, 对饱和电抗器电磁振动进行了计算分析。首先考虑磁各向异性和磁致伸缩效应, 确立了电抗器磁机械弱耦合分析模型; 其次对饱和电抗器样机实例模型进行了分析计算, 并将计算结果与不考虑三维特性进行比较分析; 最后对电抗器样机进行了振动测量实验, 并将测试结果与分析结果进行对比分析, 总结三维磁特性在提高计算分析样机电磁振动准确度的贡献。

刘 松¹ 祝丽花¹ 王 斌¹ 李永建² 张 牧¹ / 1. 天津工业大学电工电能新技术天津市重点实验室 2. 河北工业大学电气学院电工装备可靠性与智能化国家重点实验室

0 引言

电抗器是输变电系统重要的电力装备, 在电力系统中发挥众多不同的作用。电抗器产生的振动噪声不仅影响其正常运行和使用寿命, 还会产生噪声干扰^[1]。饱和电抗器由于其结构特点振动噪声较大, 已成为高校、科研院所和行业领域的研究重点。

在电抗器铁心电磁振动方面, 文献[2]利用磁感应强度与磁致伸缩应变间的数学关系, 通过数值计算得到单相电抗器的振动位移量, 并提出用高硬度的绝缘材料来填充电抗器铁心间隙的降噪措施; 文献[3]利用2D磁-机械弱耦合模型分析一台带有气隙的U形电抗器, 并通过

磁致伸缩力与麦克斯韦力相互抵消来减小电抗器垂直方向的振动, 但文中仅考虑了二维电抗器模型。国内方面, 文献[4]采用磁路-机械法在不同磁饱和程度下对可控饱和电抗器进行了二维电磁振动分析, 得出偏置电压越大, 铁心饱和程度越严重, 铁心的电磁振动越剧烈的结论; 文献[5]建立了串联电抗器铁心三维磁-机械耦合模型, 通过分别考虑铁心气隙处的电磁力、磁致伸缩力及二者的共同作用计算振动大小。目前基于三维磁特性对变压器、电抗器等电工装备铁心的电磁振动进行计算分析的研究较少。

准确测量硅钢片磁化和磁致伸缩特性, 并对铁心振动进行准确模拟, 是探究电抗器振动噪声的基础。本文利用三维磁特性测量装置获取立方硅钢铁心的三维磁特性并开展相关工作: 首先测量了无取向硅钢叠片铁心的三维磁特性, 在测量一维磁致伸缩特性基础上, 利用线弹性理论获得三维磁致伸缩特性; 其次考虑磁化和磁致伸缩各向异性特性, 确定电抗器三维磁弹性模型并进行磁场和振动的数值计算; 最后对饱和电抗器样机进行铁心振动实验测量, 并将测量结果与计算结果进行对比分析, 明确考虑三维磁特性对准确预估电抗器产品的电磁振动的贡献。

1 铁心磁特性各向异性分析

1.1 磁化特性测量

为获得电抗器无取向铁心材料的三维磁特性, 采用课题组在国家自然基金



刘 松/硕士研究生

关键词/Keywords

三维磁特性·
各向异性·
磁致伸缩·
饱和电抗器·
电磁振动·

国家自然科学基金项目(51507110, 51577131, 51690181), 天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5040)。

重点项目支持下研发的新型三维磁测量装置对立方无取向铁心进行测量,测量装置如图1所示。测量装置由三组正交的C形铁心组成,铁心和磁轭材料采用高饱和密度、高磁导率的取向硅钢片,以实现被测样品达到饱和磁化状态;传感线圈采用特殊漆包线,保证了微小信号的检测准确度^[6-7]。通过励磁立方样品的 x 、 y 和 z 三方向磁场,实现硅钢叠片的空间磁化测量。

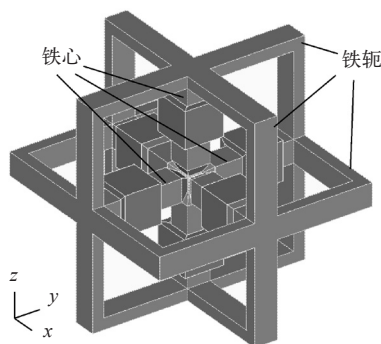


图1 三维磁性测量装置

将立方结构的样品材料放在6个磁极中间,定义样品叠片方向为 z 方向。在进行磁场计算分析时引入三维磁化曲线,实验数据如图2所示。在测量坐标系中,无取向硅钢 x 方向和 y 方向的磁化曲线相差不大,但具有磁各向异性特性。当接近饱和时, x 方向和 y 方向磁导率相近,叠片厚度 z 方向的磁导率近似为线性。

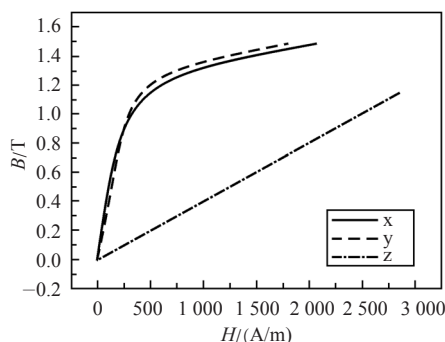


图2 无取向硅钢三维磁化特性曲线

采用如图3所示的德国BROCKHAUS生产的满足国际电工委员会IEC 60404-3测量标准的磁致伸缩测量装置对无取向硅钢片进行磁致伸缩特性的测量。对无取向硅钢易磁化方向磁致伸缩测量的结果曲线如图4所示。

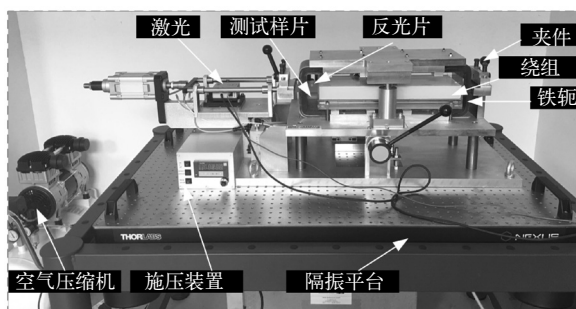


图3 磁致伸缩测量装置MST500

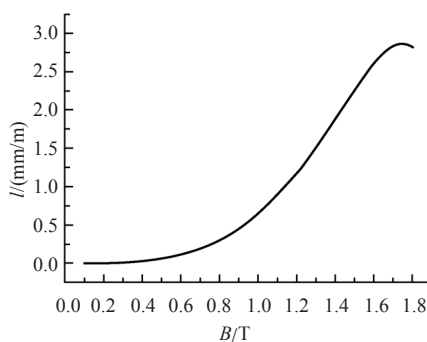


图4 无取向硅钢磁致伸缩曲线

1.2 各向异性分析

考虑电抗器铁心的磁路主要为正交磁通,忽略旋转磁场对磁阻张量的贡献,磁导率采用对角线张量形式,表示为

$$\bar{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中,磁导率在直角坐标系中的分量 μ_i ($i=x, y, z$)可通过 B_i/H_i 测量曲线获得。

由于铁心常采用叠片结构,叠片铁心中的硅钢片涂有绝缘层,绝缘层的厚度相对于铁心非常薄,在有限元计算时会产生巨大的剖分网格数量,以至于难以进行精细化研究。为了方便建模以及减少数值计算时间,对叠片铁心叠制方向采用均匀化方法作等效处理,并引入叠片系数 F 。在叠片方向(即 z 方向)的磁导率修正为

$$\mu_z = \frac{\mu_0 \mu_{tz}}{(1-F)\mu_{tz} + F} \quad (2)$$

式中,真空的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; μ_{tz} 为叠片

方向测量得到的相对磁导率。

考虑实际叠片铁心的三维特性，依据线磁致伸缩理论，认为铁心硅钢片的体积始终保持不变。当线圈绕组励磁后，硅钢片轧制方向伸长，则垂直轧制方向和叠片方向均会收缩。磁致伸缩应变的本构方程可表示为

$$\varepsilon_x = \lambda_x \quad (3)$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\frac{1}{2}\lambda_x \quad (4)$$

式中， λ_x 为易磁化方向的磁致伸缩量。

2 考虑磁各向异性磁弹性数值分析

本文以型号为EKDG-4.4 kvar的干式单相电抗器为研究对象，根据样机结构的对称性，采用1/2有限元模型，如图5所示。

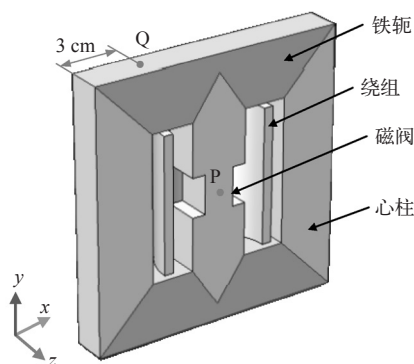


图5 饱和电抗器计算分析模型

基于前期研究基础，采用磁-机械弱耦合模型对饱和电抗器进行数值分析，弱耦合模型重新写为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}\mathbf{A} &= \mathbf{J} \\ \mathbf{K}\mathbf{u} &= \mathbf{f}_{\text{mw}} + \mathbf{f}_{\text{ms}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $\mathbf{S}$ 为电磁矩阵； $\mathbf{K}$ 为机械刚度矩阵； $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{u}$ 分别为模型中待求的磁矢位和位移； $\mathbf{J}$ 为外电流密度； $\mathbf{f}_{\text{mw}}$ 和 $\mathbf{f}_{\text{ms}}$ 分别为电磁力和磁致伸缩力贡献。

考虑三维叠片铁心磁化过程的非线性和各向异性，模型中上下铁轭和3个铁心柱的磁导率、磁致伸缩赋值如下表所示。

表 铁心磁各向异性赋值

区域	磁导率	磁致伸缩量
铁轭	$\begin{pmatrix} \mu_x(B_x) & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y(B_y) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z(B_z) \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \varepsilon_x(B_x) & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y(B_y) & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z(B_z) \end{pmatrix}$
心柱	$\begin{pmatrix} \mu_y(B_y) & 0 & 0 \\ 0 & \mu_x(B_x) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z(B_z) \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \varepsilon_y(B_y) & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_x(B_x) & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z(B_z) \end{pmatrix}$

为获得更精准的应力结果，对铁心中柱部分的网格进行细化剖分，特别是工作在饱和状态的铁心磁阀区域，铁心的网格剖分截面如图6所示。其中，四面体单元数量为12 056，平均单元质量为0.654 3。通过对电抗器铁心进行三维电磁场计算，由磁致伸缩特性曲线和磁致伸缩应变本构方程计算得到铁心磁致伸缩应变，并在结构力场中与麦克斯韦力共同作用，进而计算得到求解区域的振动情况。

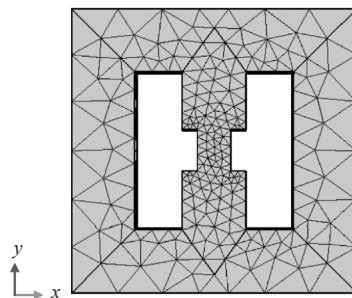
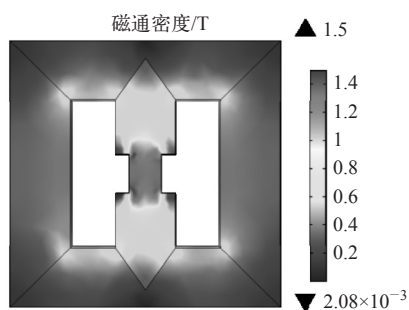
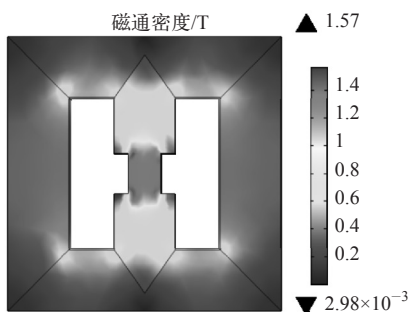


图6 网格剖分截面图

当电抗器通电工作时，工作情况类似一台空载状态的单相变压器。铁心的磁通密度模值分布如图7所示，由于磁阀结构作用，电抗器铁心中柱磁通密度较为集中，总体磁场呈对称分布。采用实测叠片铁心的三维磁参数，即考虑三维磁特性后，与磁各向同性的计算结果相比，铁心磁通密度分布变化不明显，但是磁通密度模的最大计算值与最小计算值均小于未考虑三维磁参数的情况，说明叠片方向的磁化特性对磁场的计算结果也具有影响。图8为铁心中心y-z截面上磁通密度的z分量，通过计算结果分别比较铁心磁通密度x分量和y分量，可得出三个方向中磁通密度z分量的数值变化较大。

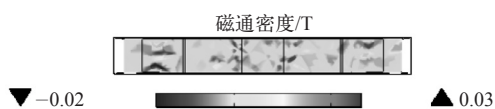


(a) 考虑三维磁参数

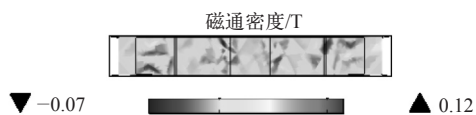


(b) 未考虑三维磁参数

图7 铁心磁通密度模值分布



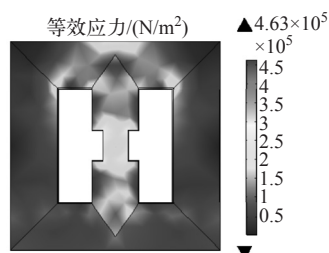
(a) 考虑三维磁参数



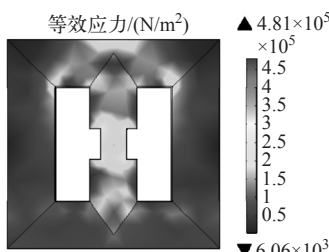
(b) 未考虑三维磁参数

图8 y-z截面的磁通密度z分量

在弹性力场中,铁心应力是产生振动的直接原因,为比较三维磁特性对铁心应力计算的影响,基于磁场计算结果,通过磁-机械耦合计算得到铁心的应力分布,铁心等效应力计算结果如图9所示。依据铁心磁密模的计算结果,当磁通密度增大0.07 T时,铁心等效应力增大了18 000 N/m²。图10为铁心中心y-z截面上的应力z分量分布,既有正应力也有负应力。考虑三维磁特性参数后,其最大正应力变化了6.869%,最大负应力变化了1.604%。铁心等效应力的分布云图变化不大,但对于叠片铁心磁场和结构力场计算准确度的提升以及产品的优化设计,叠片铁心在叠制方向的磁特性参数是不能忽视的。

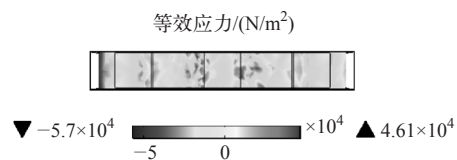


(a) 考虑三维磁参数

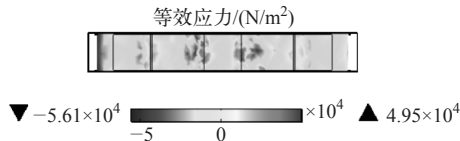


(b) 未考虑三维磁参数

图9 铁心等效应力分布



(a) 考虑三维磁参数



(b) 未考虑三维磁参数

图10 y-z截面的应力z分量

在铁心磁阀区域均出现了磁场和应力的集中分布,本文以选取铁心模型中的P点为例,位置如图5中所示,分别在考虑三维磁特性以及未考虑三维磁特性两种情况下进行应变计算,计算结果如图11所示。由于图中P点应变的y分量与铁心柱的主磁通方向相同,即为易磁化方向,所以与应变的x、z分量相比,y方向分量的应变最大,由材料特性描述不准确造成的误差最大,可达0.108 μm/m。当应变y分量为正时,应变的x、z分量均为负,即铁心柱的应变具有各向异性,其x、y和z分量并非同时发生正应变或负应变,与理论分析相一致。

3 振动测量与分析

为验证数值计算的有效性,对单相电抗器样

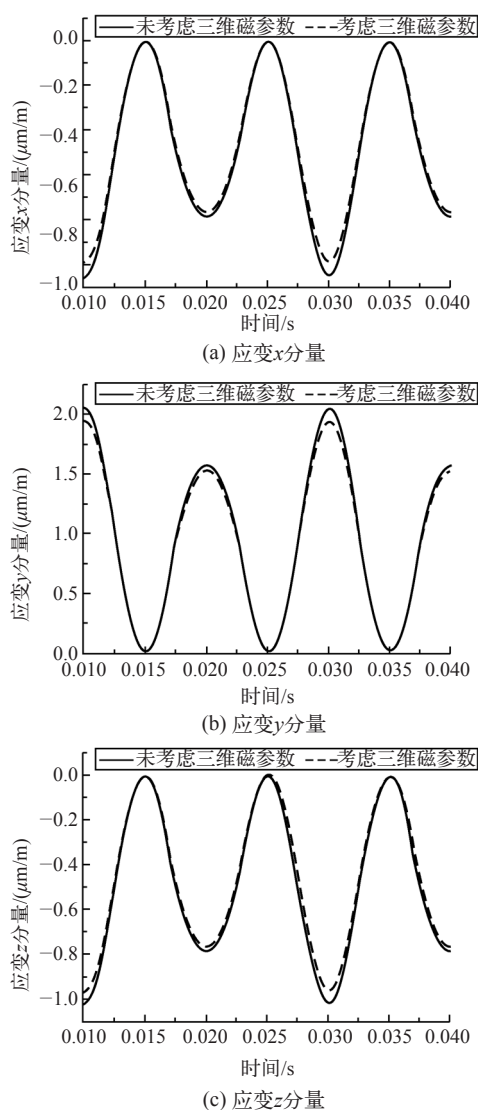


图11 铁心P点应变

机进行电磁振动测量分析。搭建电抗器振动测量系统,如图12所示。其中振动信号传感器为ICP压电型,因为考虑了叠片方向的作用,本实验的加速度传感器为三维探头,其 x 、 y 和 z 三方向的加速度分别为 0.491 m/s^2 、 0.482 m/s^2 和 0.484 m/s^2 ,并且坐标系与仿真模型图5保持一致。

测得铁心P点处 x 、 y 和 z 三方向的振动加速度数据如图13所示。图中分别为P点振动加速度 x 、 y 和 z 分量,振动周期为 0.01 s ,表现为供电频率的2倍。P点处 x 方向的振动加速度峰值大于其他两个方向,且振动加速度的三个方向并不是同时为正或负。为方便对比分析计算值与实验测量值,数据经滤波和曲线平滑处理,时间选取两个振动周

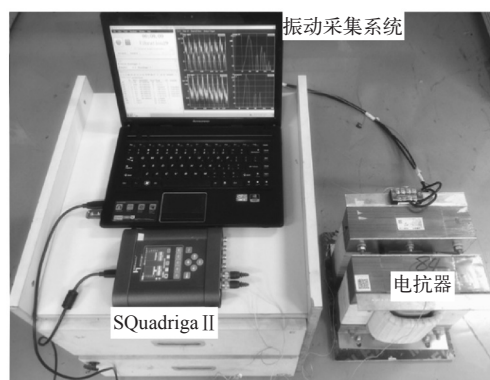


图12 样机振动测量系统

期 $0.04 \sim 0.06 \text{ s}$,分析结果如图14所示。研究结果表明振动加速度模值的最大计算误差由 14.834% 减小到了 9.277% ,在 220 V 供电电压下,总体上考虑三维磁特性有利于计算结果趋向真实测量值。考虑三维磁特性后振动峰值的计算结果仍与实验测量值存在一定误差。一方面,由于磁致伸缩计算依据线磁致伸缩理论,叠片方向的磁致伸缩并不是实际测量值,对 z 方向的应力及振动计算有一定的影响;另一方面,实际电抗器样机因具有夹件作用力等外界因素,磁特性也会受叠制方向应力影响,铁心本体具有更为复杂的振动特性,特别是大容量电力电抗器,全面的磁特性分析对于铁心振动分析具有重要意义。

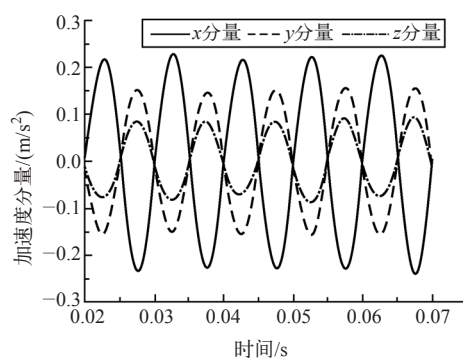


图13 铁心P点处的振动加速度曲线

4 结束语

本文在测量无取向硅钢叠片铁心三维磁特性的基础上,利用铁心磁弹性弱耦合计算模型,考虑磁化和磁致伸缩各向异性特性,对一台 4.4 kvar 的单相电抗器是否考虑三维磁特性分别进行了磁

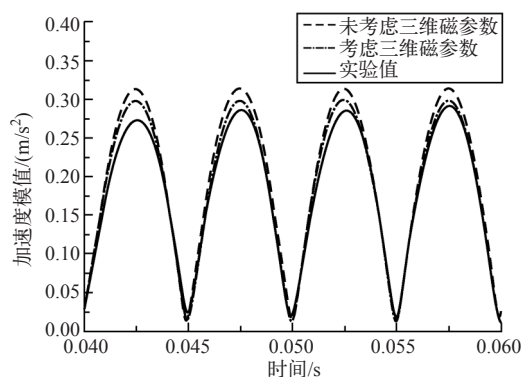


图14 加速度计算与测量结果对比

和应力振动计算和分析, 获得了铁心的磁场、应力分布和振动加速度曲线, 真实反映了铁心变形情况。最后, 通过饱和电抗器样机铁心振动测量与计算分析结果对比, 显示考虑三维磁特性有利于减小计算值与测量值间的误差, 提高了计算分析的准确性。本文的样机计算结果表明考虑三维磁特性, 铁心振动加速度模值最大计算误差由14.834%减小到了9.277%, 误差减小了约5%, 有利于更加准确地预算电工装备电磁振动噪声, 意义重大。

参考文献

- [1] Gao Yanhui, Muramatsu Kazuhiro, Fujiwara Koji, et al. Vibration analysis of a reactor driven by an inverter power supply considering electromagnetism and magnetostriction[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2009, 45(10): 4789-4792.
- [2] Gao Yanhui, Nagata Masahide, Muramatsu Kazuhiro, et al. Noise reduction of a three-phase reactor

by optimization of gaps between cores considering electromagnetism and magnetostriction[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2011, 47(10): 2772-2775.

- [3] Rossi Mathieu, Le Besnerais Jean. Vibration reduction of inductors under magnetostrictive and Maxwell forces excitation[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2015, 51(12): 1-6.
- [4] 杨意妹, 祝丽花, 王斌, 等. 考虑磁致伸缩效应的可控饱和电抗器电磁振动分析[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(8): 40-45.
- [5] 闫荣格, 刘维影, 吴越超, 等. 串联铁心电抗器的振动研究[J]. 电气应用, 2017, 36(13): 50-53.
- [6] Li Yongjian, Yang Qingxin, Zhu Jianguo, et al. Design and analysis of a novel 3-D magnetization structure for laminated silicon steel[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2014, 50(2): 389-392.
- [7] Li Yongjian, Cao Lei, Yang Qingxin, et al. Comprehensive magnetic properties analysis of the silicon steel considering the laminated direction[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-5.
- [8] 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.

(收稿日期: 2018-07-25) **EA**